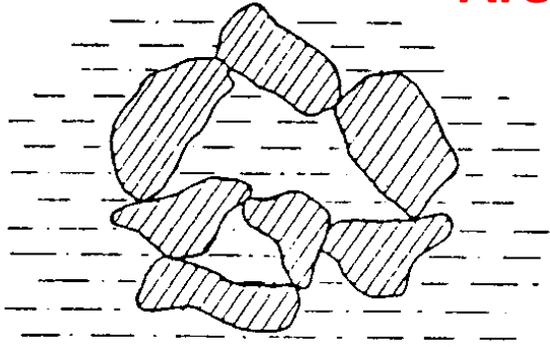


# Algumas Aplicações de Conceitos de Solos Não Saturados a Obras Geotécnicas

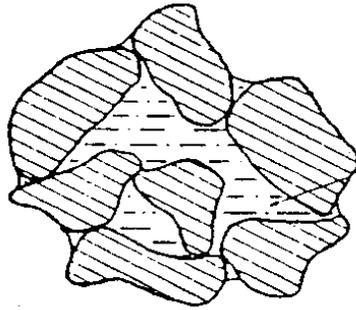
Fernando A. M. Marinho  
Universidade de São Paulo  
2019

# Efeito da tensão aplicada e da sucção

**Areia**

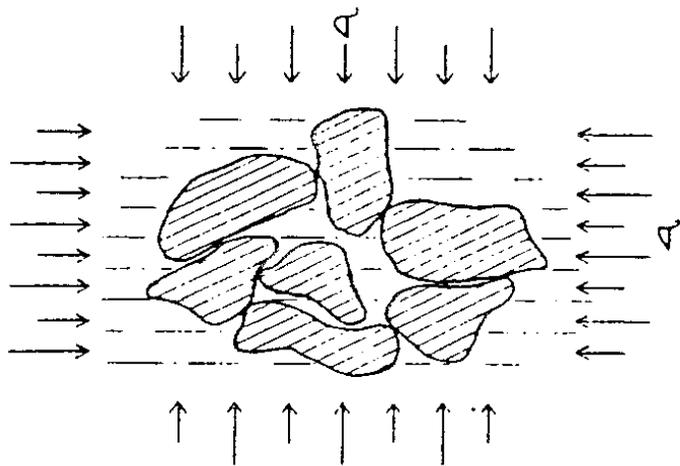


(a)

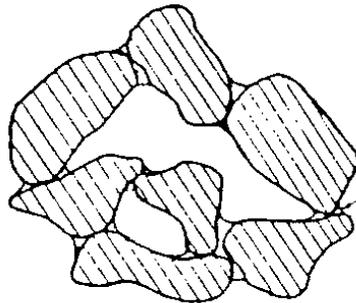


(c)

Sucção



(b)



(d)

Sucção

$$\sigma' = \sigma - u_w$$

$$\sigma' = \sigma - u_a + \chi(u_a - u_w)$$

# O que há de diferente no enfoque “não saturado”?

Duas fases x Três fases

Variáveis de tensões e o princípio das tensões efetivas (validade)

Interação com o meio ambiente

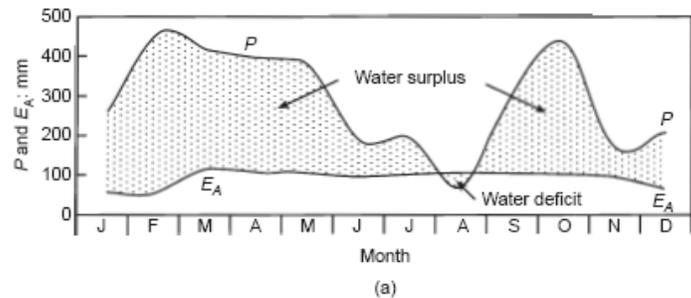
## Sumário da Apresentação

1. Uso da curva de retenção (CR).
2. O perfil de sucção e seu uso associado a CR.
3. Solos expansivos
  - Parâmetros e procedimento de cálculo de expansão.
4. Fluxo em meio não saturado e uma interpretação da curva de retenção para uma Mina de Calcário.
  - Parâmetros.
  - Condições de contorno.
5. Estabilidade de taludes.
  - Escolha de parâmetros
  - O perfil de sucção e o clima.
  - Abordagem de análise considerando a não saturação.

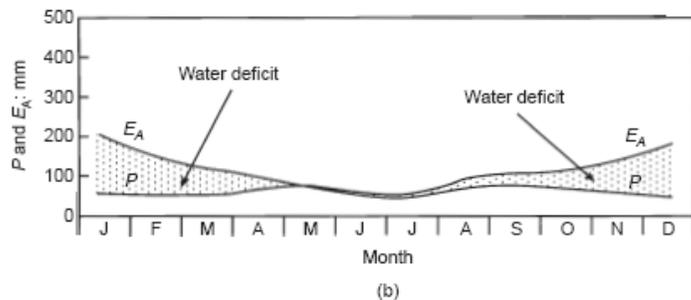
# Comportamento Geral do SNS

		Solo Não Saturado
Característica	Índice de vazios	Diminui com a tensão aplicada, aumenta com o aumento da saturação em solos potencialmente expansivos, diminui com a redução da saturação em solos potencialmente expansivos e diminui com a aumento da saturação em solos colapsíveis.
	Resistência ao cisalhamento	Aumenta com a tensão aplicada, diminui com o aumento da saturação e aumenta com a diminuição da saturação
	Compressibilidade	Aumenta com o aumento da saturação e diminui com a diminuição da saturação
	Condutividade hidráulica	Aumenta com o aumento da saturação e diminui com a diminuição da saturação.

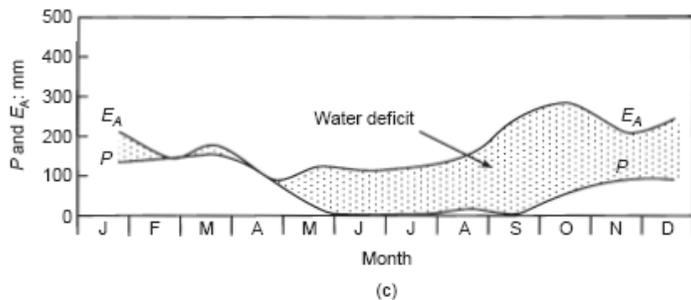
# Diferentes tipos de balanços atmosféricos:



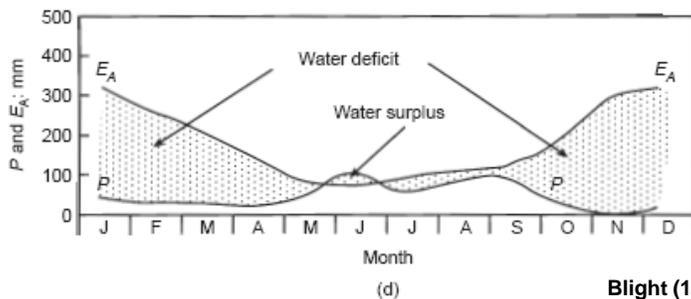
Kuala Tahan, Malásia, 1984;



Melbourne, Austrália, média de 30 anos



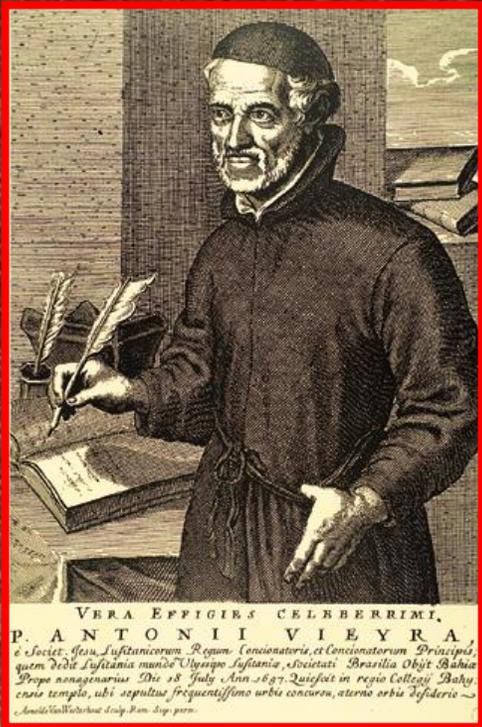
Johannesburg, Africa do Sul, 1987



Cape Town, Africa do Sul, 1992

$E_A$  - Evaporação do tanque classe "A"  
P - Precipitação

# A influência do Clima no Nascimento de Vícios e Virtudes



Sermão da Quinta Dominga da Quaresma

Na Igreja Maior da Cidade de São Luís no Maranhão. Ano de 1654



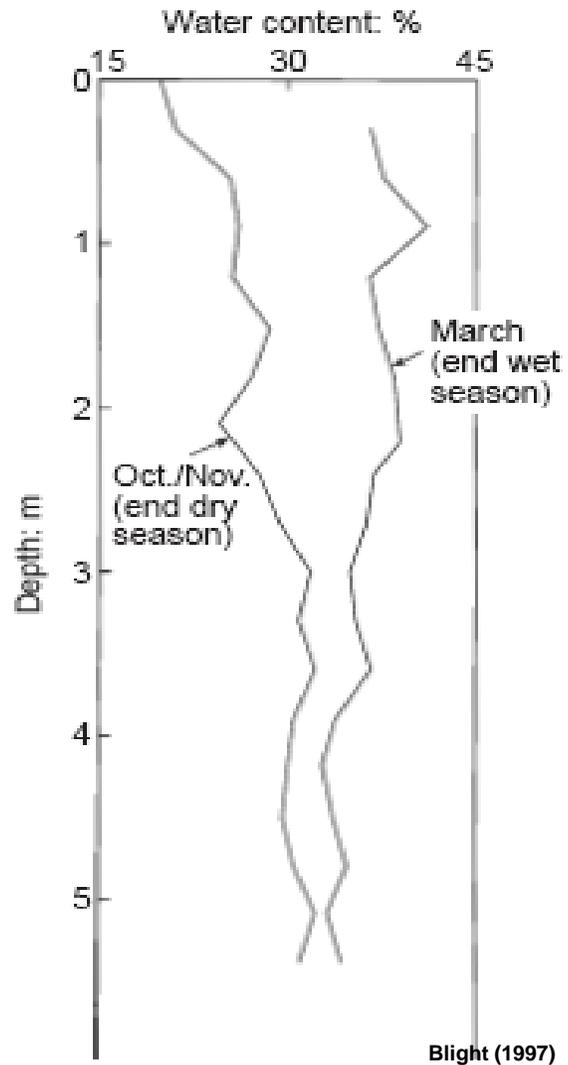
## § III

A influência do clima no nascimento de vícios e virtudes. Os dois vícios dos cretenses: mentira e preguiça. As mais desfechadas mentiras que nunca se ouviram nem imaginaram. A mentira, filha primogênita do ócio. A proposição de Davi. O juízo temerário. A língua, a fera mais difícil de enfrear.

319 Ora, eu me pus a especular a causa por que o clima e o céu desta terra influi tanta mentira, e parece-me que achei a causa verdadeira e natural. Assim como o céu com uma virtude influi outra virtude, assim o clima, que também se chama céu, com um vício influi outro vício. Ponhamos o exemplo na verdade, que é a virtude contrária da mentira: *Veritas de terra orta est* (Sl 8, 12), diz Davi: A verdade nasceu da terra. — E logo advertiu que a terra de que falava não era tôda a terra, senão a sua: *Et terra nostra dabit fructum suum* (11). Mas donde lhe veio aquela terra — que era a de Promissão — donde veio uma virtude tão singular no mundo, que nascesse dela a verdade? O mesmo profeta o disse: *Veritas de terra orta est, et justitia de coelo prospexit* (12).

(11) E a nossa terra produzirá o seu fruto (Sl 84, 13).

(12) A verdade nasceu da terra, e a justiça olhou desde o céu (Sl 84, 12).

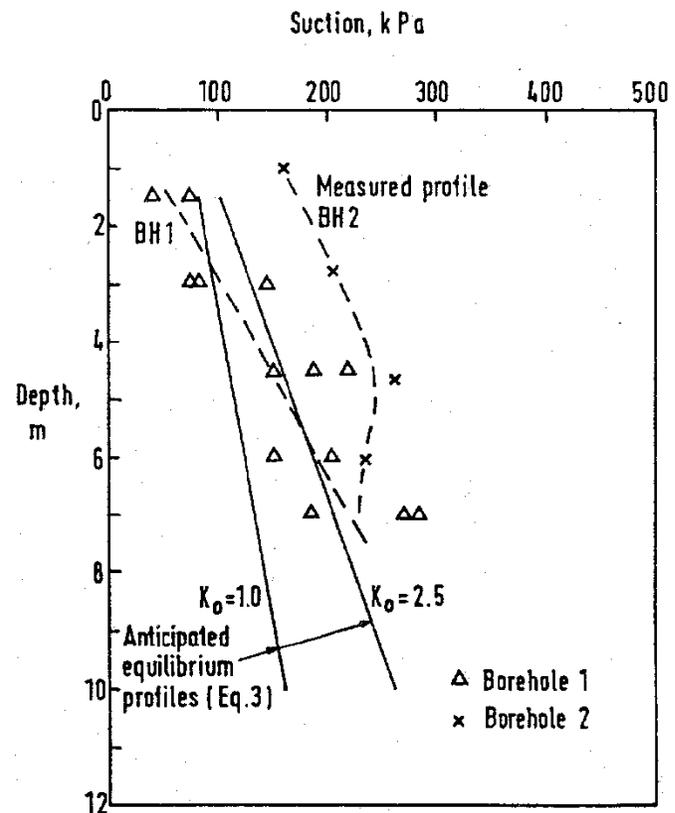
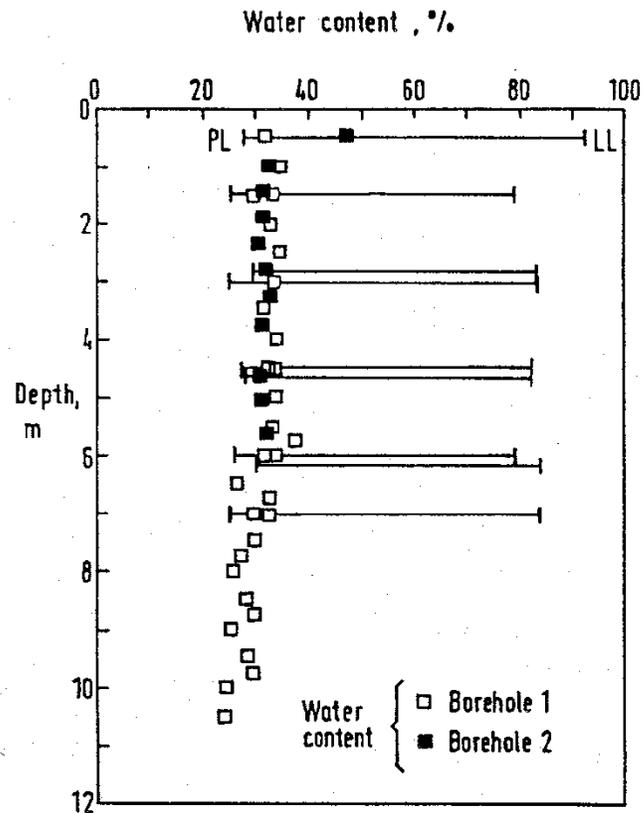


**Varição sazonal de teor de umidade nas laterais do pavimento de um aeroporto em Israel**

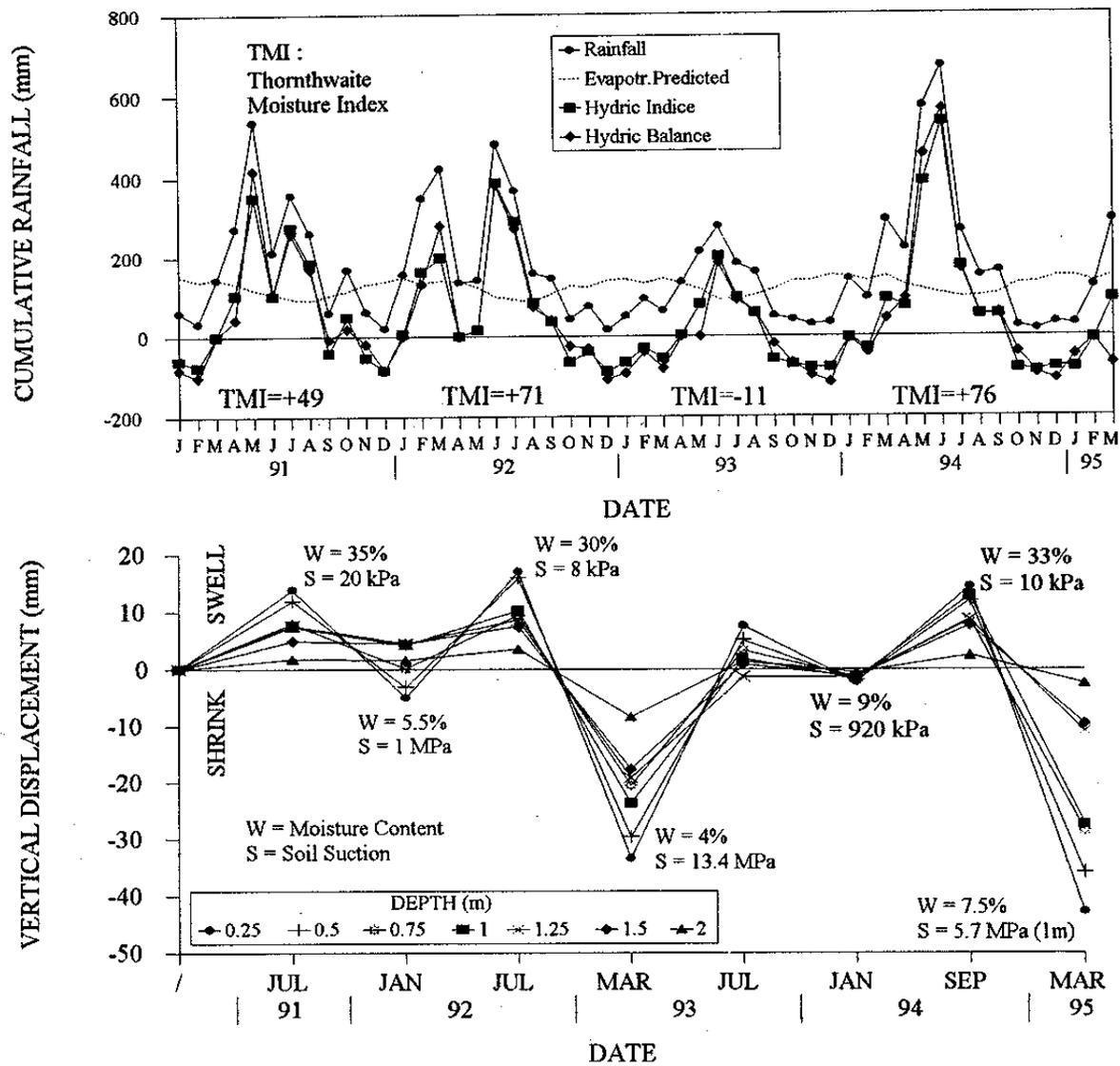


## Variação sazonal associada com a presença de vegetação

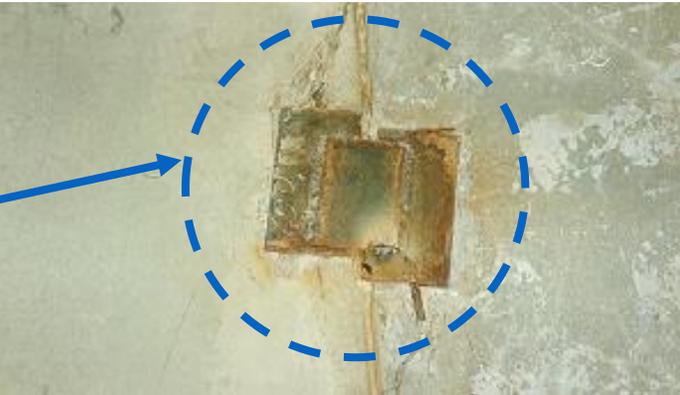
wembley

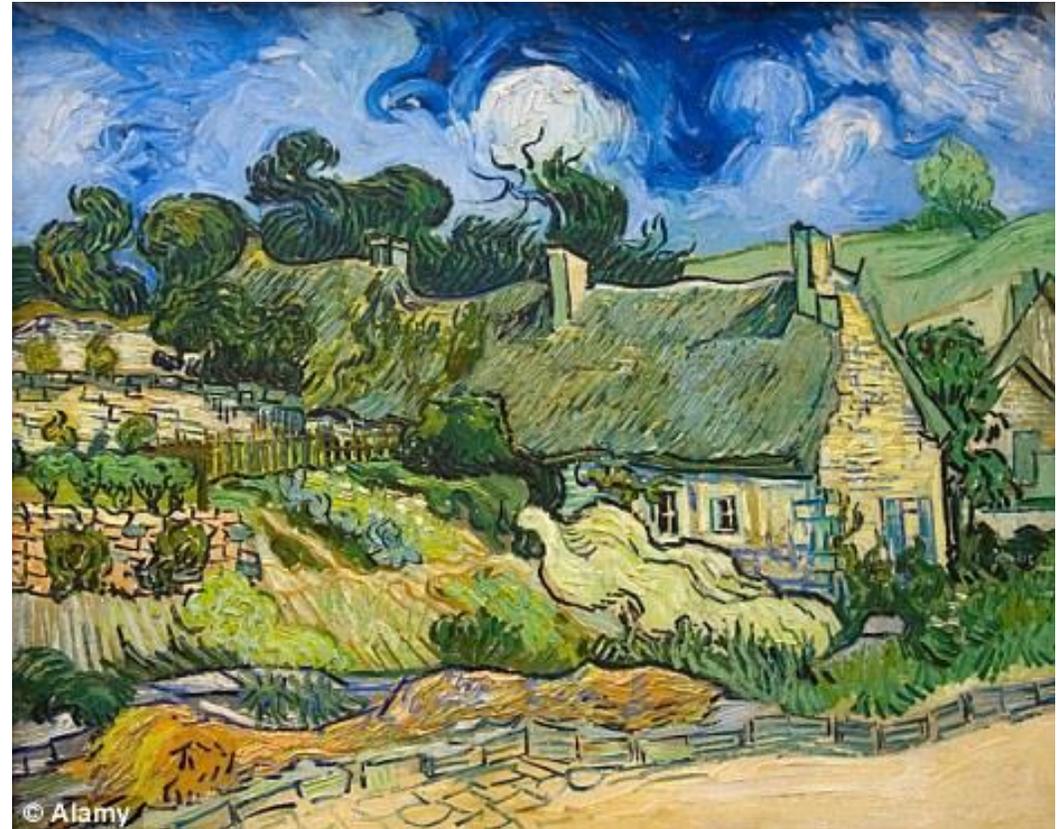
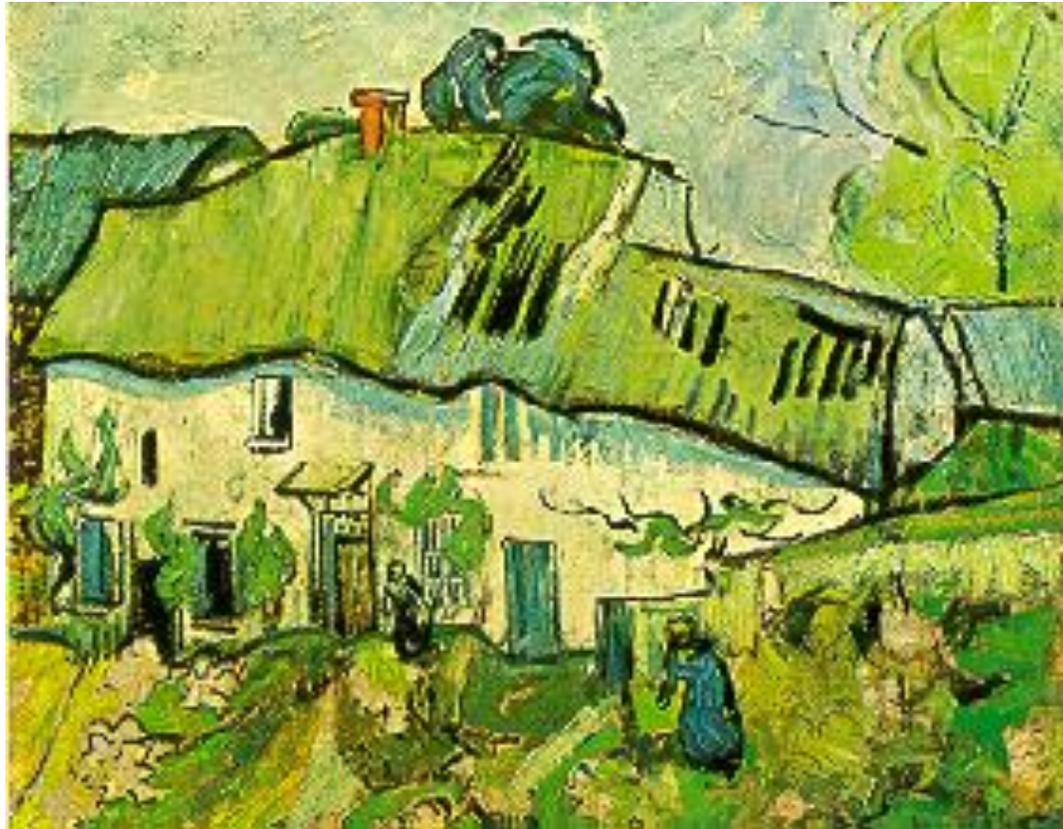


# Variação Volumétrica e as Condições Climáticas



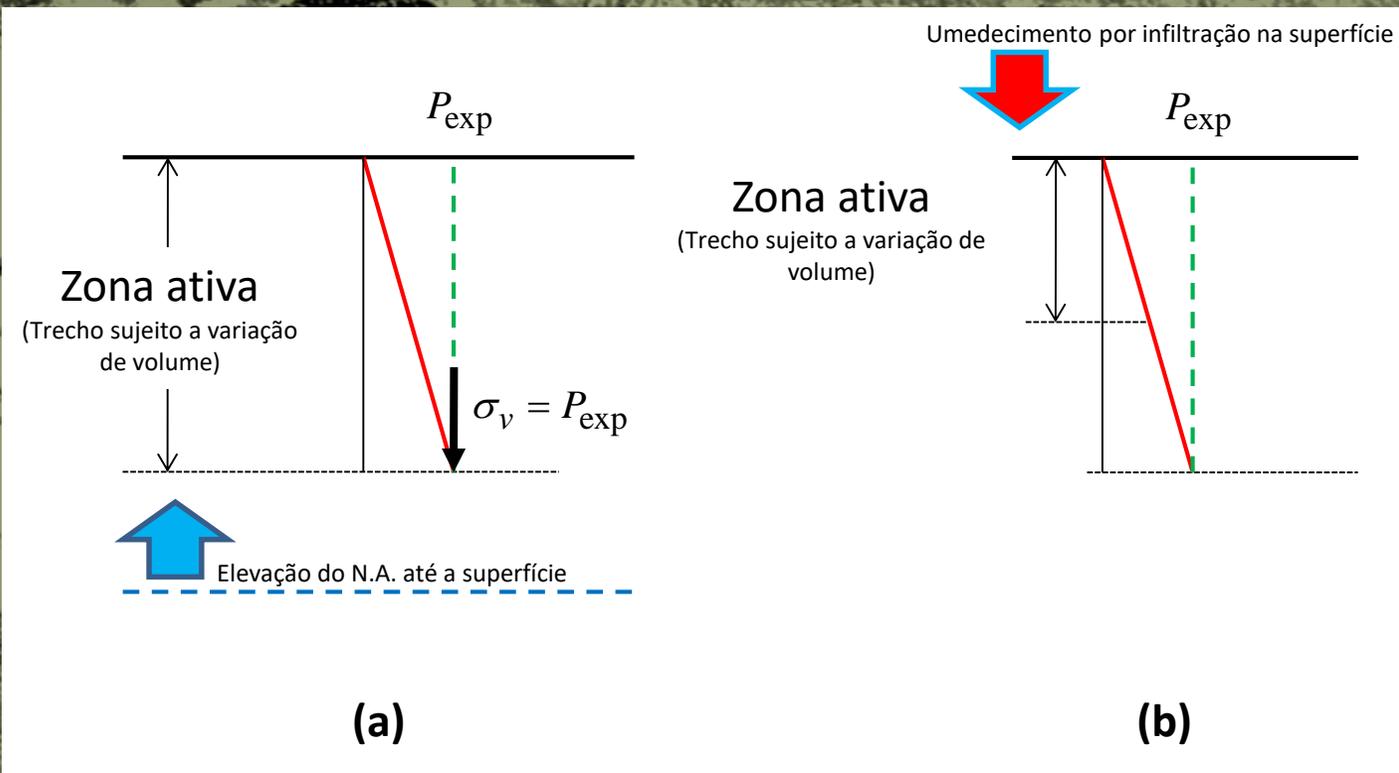
Dallas – Texas - 1992



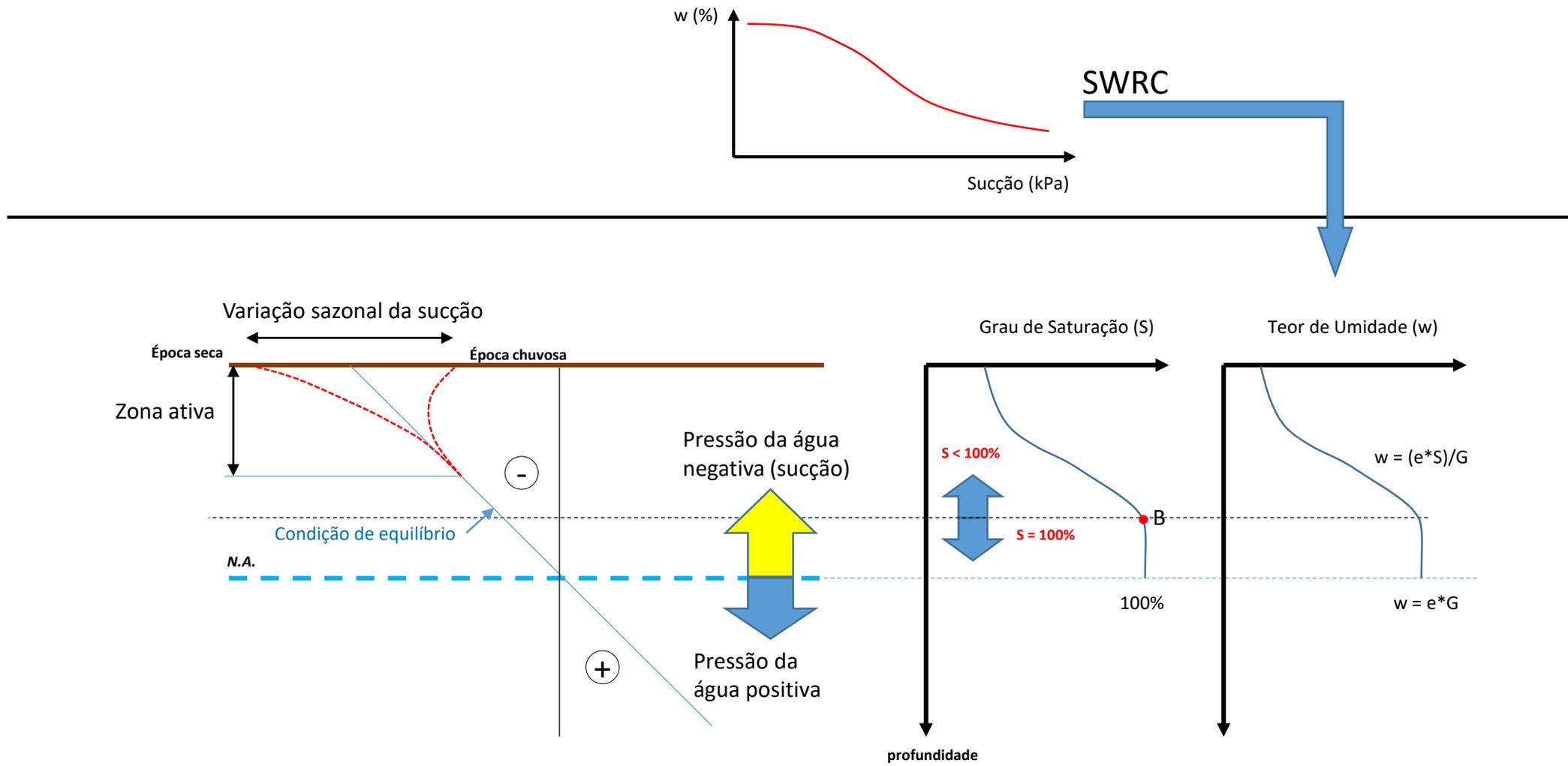


Van Gogh (1890)

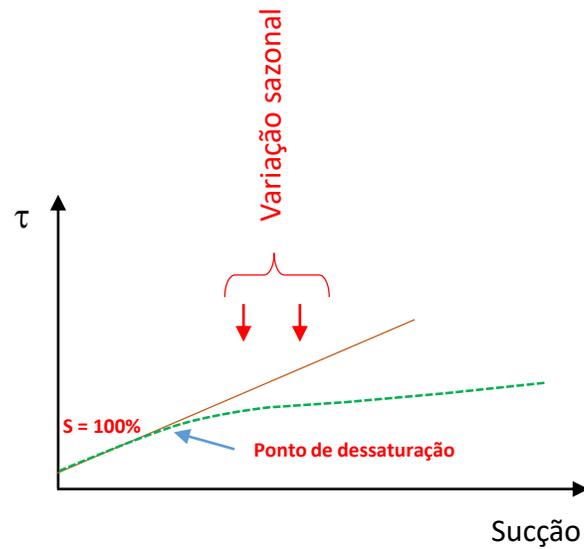
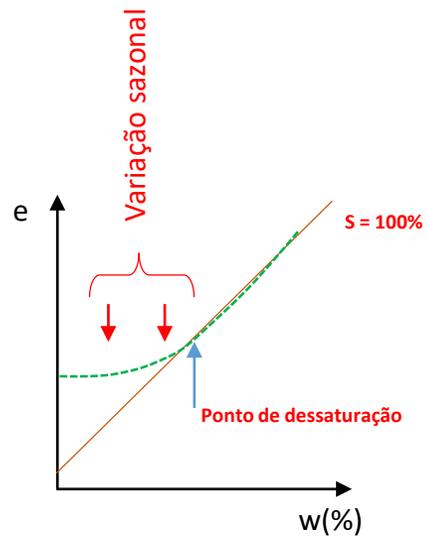
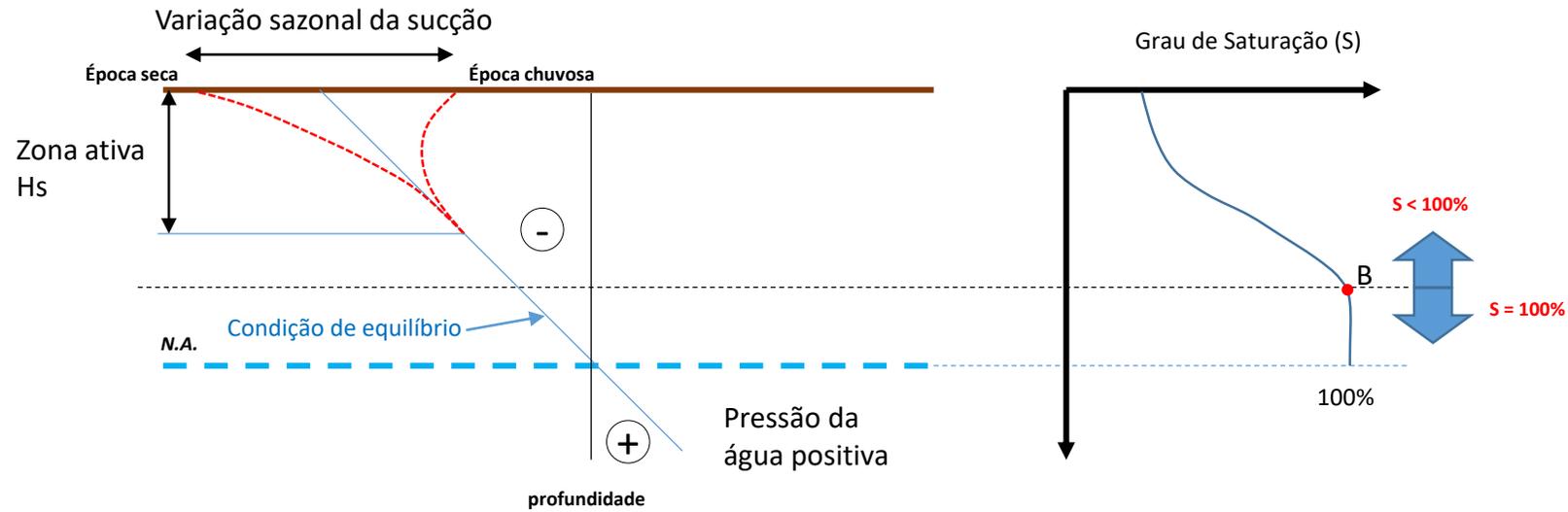
# Definição da Zona Ativa



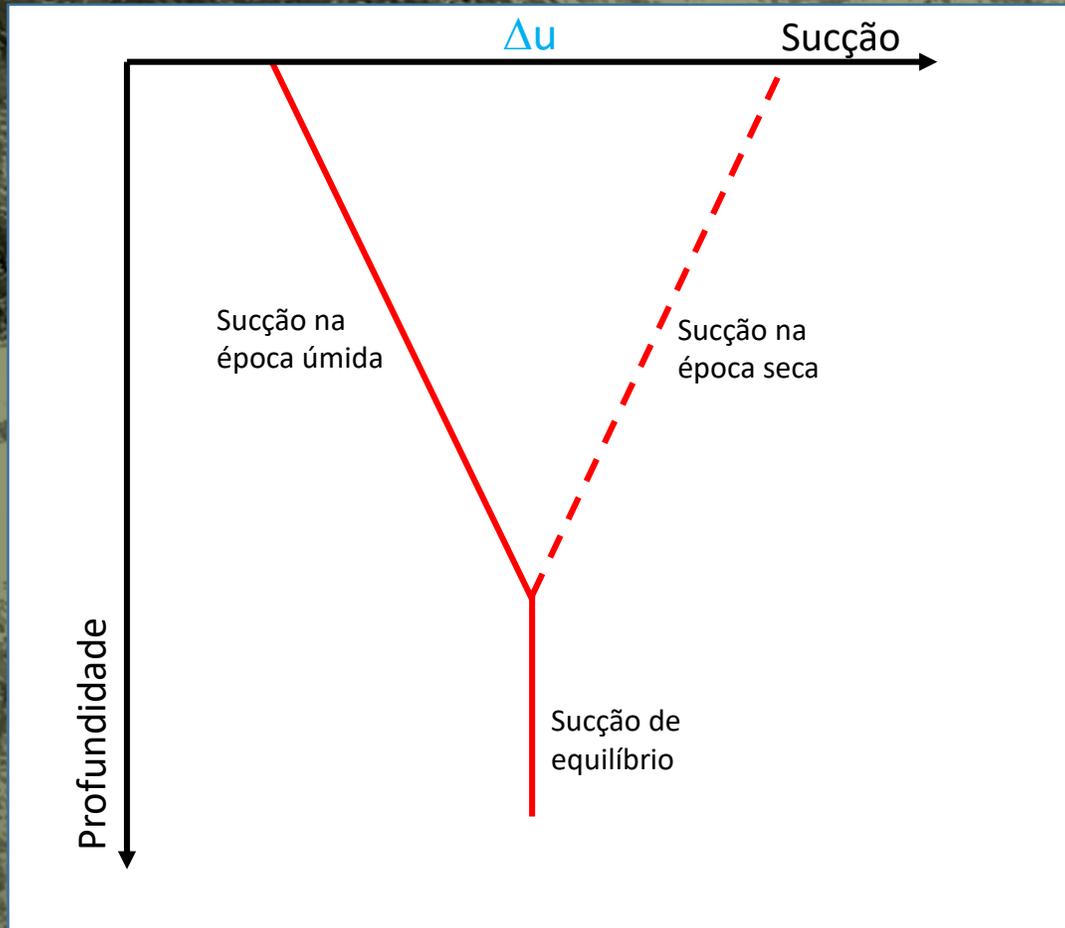
# A Curva de Retenção de Água, o Perfil de Sucção e o Comportamento do Solo (resistência e deformabilidade)



# A Curva de Retenção de Água, o Perfil de Sucção e o Comportamento do Solo (resistência e deformabilidade)



## Como definir o perfil de sucção a ser utilizado?



Modificado de AS2870 (2011)

# Variação de Hs com o índice Climático – TMI

TMI	Zona Ativa (H <sub>s</sub> ) - m
>10	1.5
≥-5 a 10	1.8
≥-15 a ≤-5	2.3
≥-25 a ≤-15	3
≥-40 a ≤-25	4
≤-40	>4

AS 2870-2011

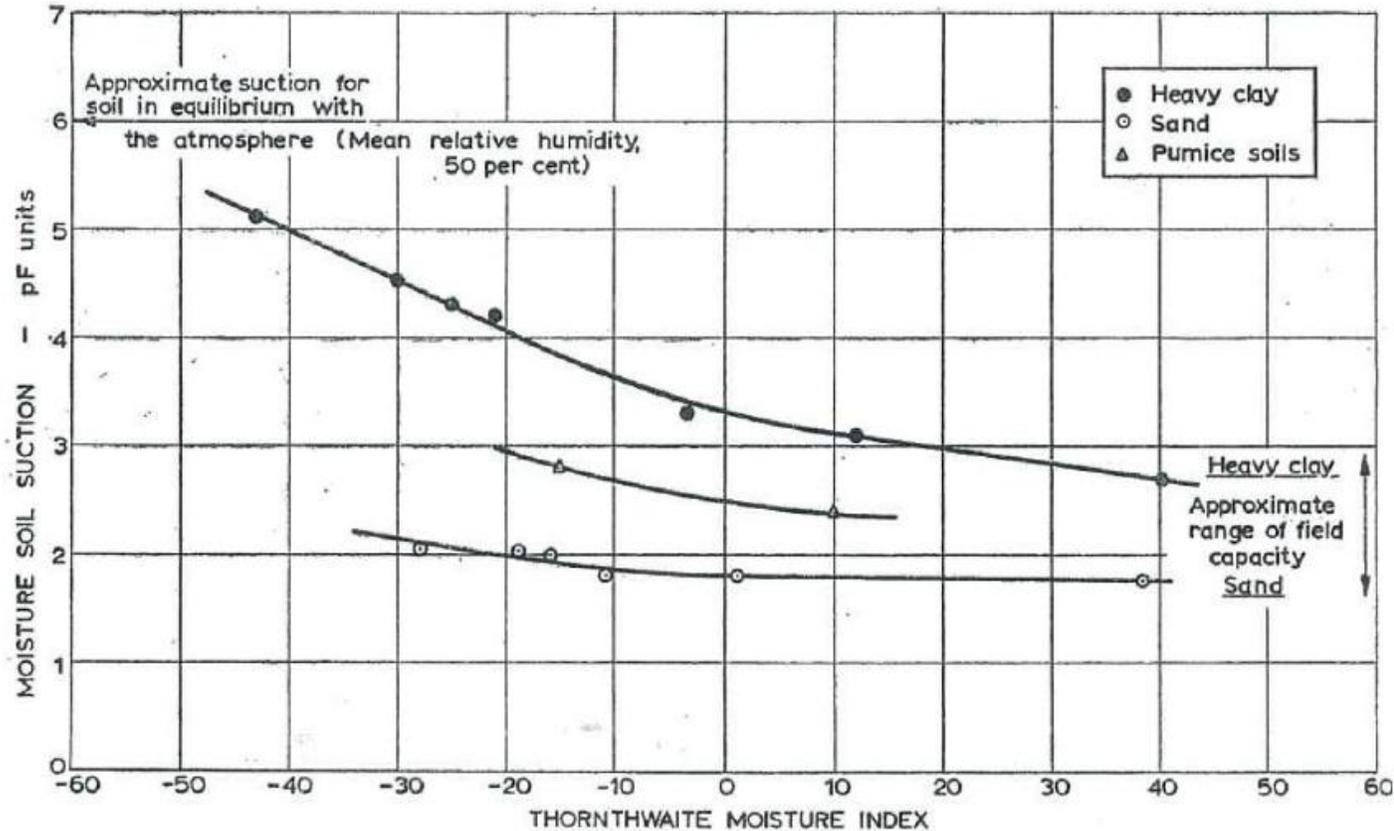


Table 2. TMI and Depth to Constant Suction Classification in Australia Based on Thornthwaite and Mather (1955) model (from Fityus et al. 1998).

Climate Classification	TMI	Depth to Constant Suction (m)
Wet Coastal/Alpine	>40	1.5
Wet Temperate	10 to 40	1.5 to 1.8
Temperate	-5 to 10	1.8 to 2.3
Dry Temperate	-25 to -5	2.3 to 3.0
Semi-arid	<-25	3.0

Table 3. TMI versus Depth to Constant Suction for Several Cities in US Based on Thornthwaite (1948) model (from McKeen and Johnson 1990).

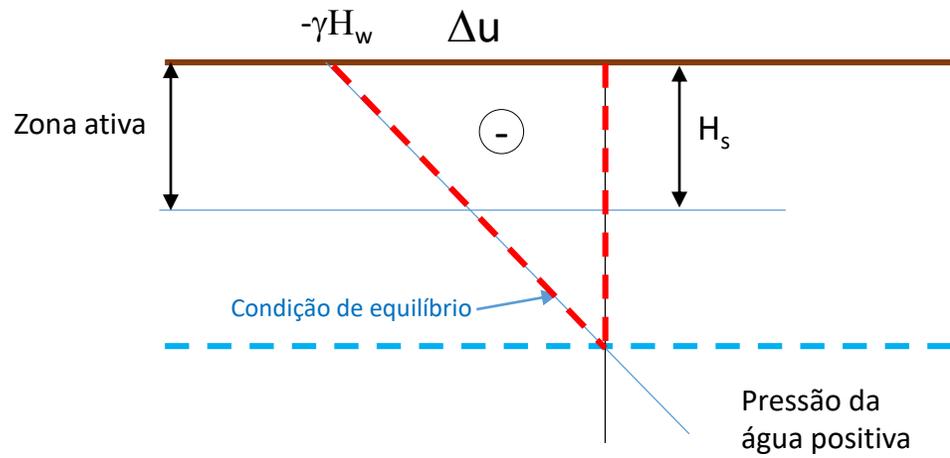
Site	TMI	Depth to Constant Suction (m)
Amarillo	-55.6	3.7
Dallas	-30.5	2.1-4.6
Houston	45.7	1.5-3.0
San Antonio	-40.6	3.0-9.1
Jackson	76.2	3.7
Gallup	-81.3	1.2
Denver	-25.4	3.0

Climatic Zone	Description	H <sub>s</sub> (m)	Δ u (pF)	Equilb Soil Suction (pF)
2	Wet	1.8 to 2.0	1.5	3.8
3	Temperate	2.3	1.2 to 1.5	4.1
4	Dry	3.0	1.2 to 1.5*	4.2
5	Temperate Semi-arid	4.0	1.5 to 1.8	4.4

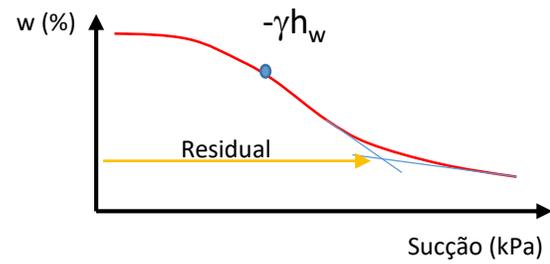
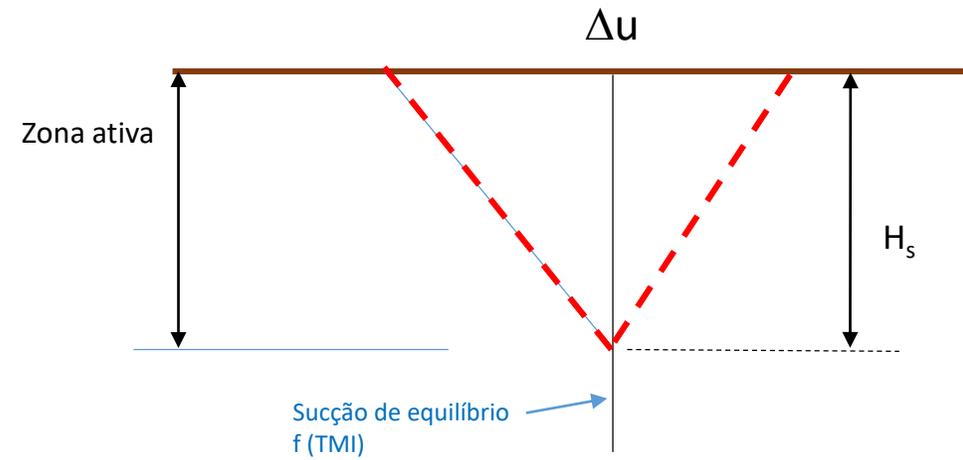
Barnett & Kingsland (1999)

# Como definir o perfil de sucção a ser utilizado?

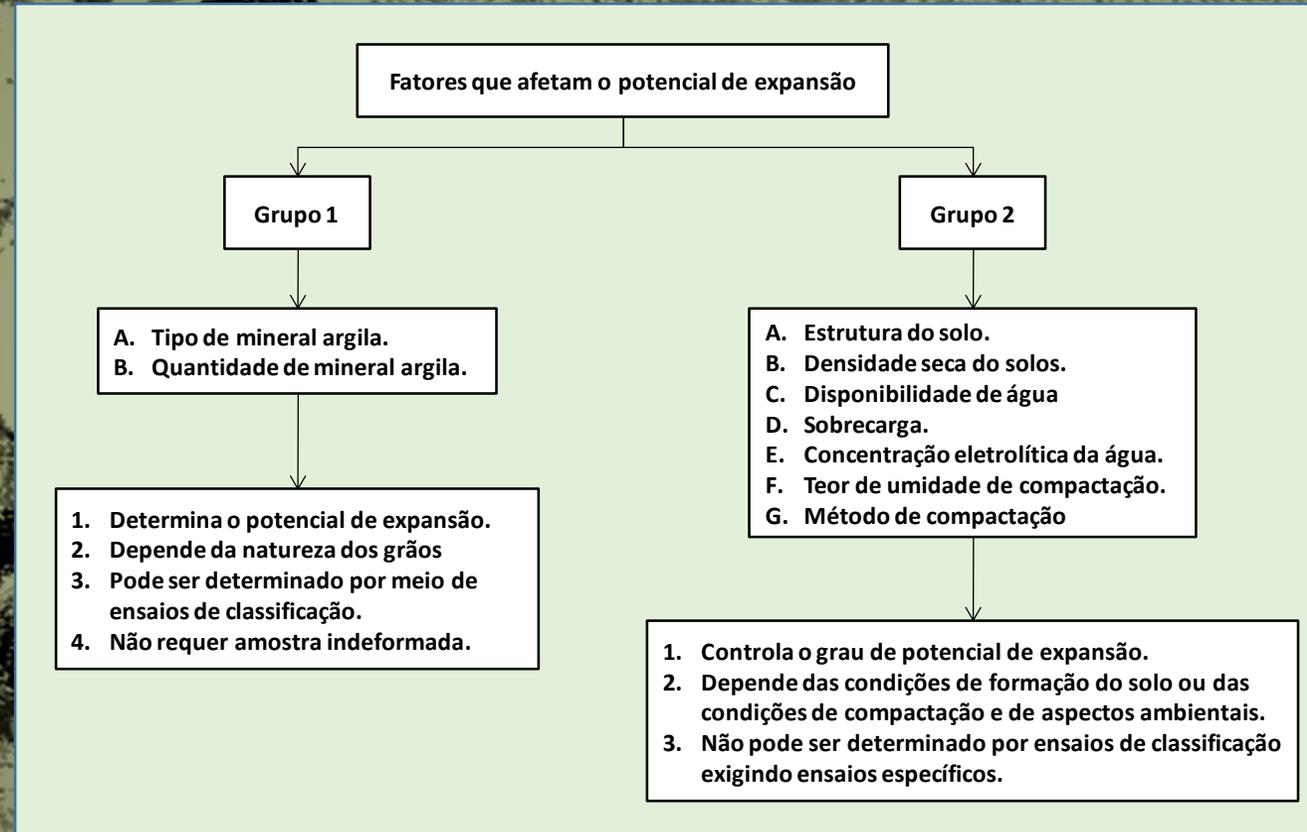
## Com N.A. próximo



## Sem N.A. próximo



# Como Os Solos Potencialmente Expansivos



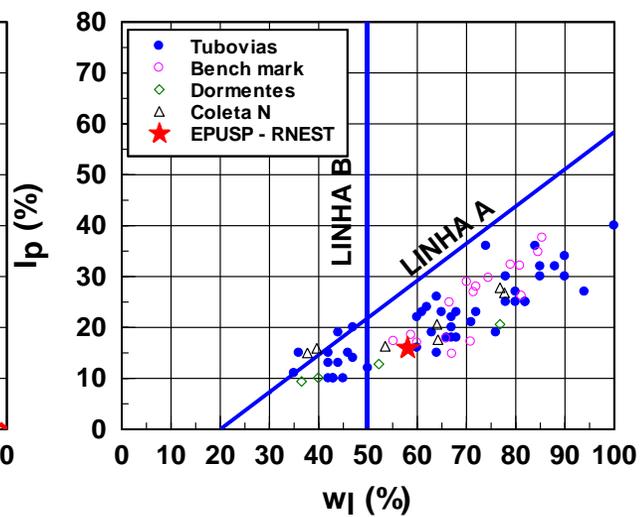
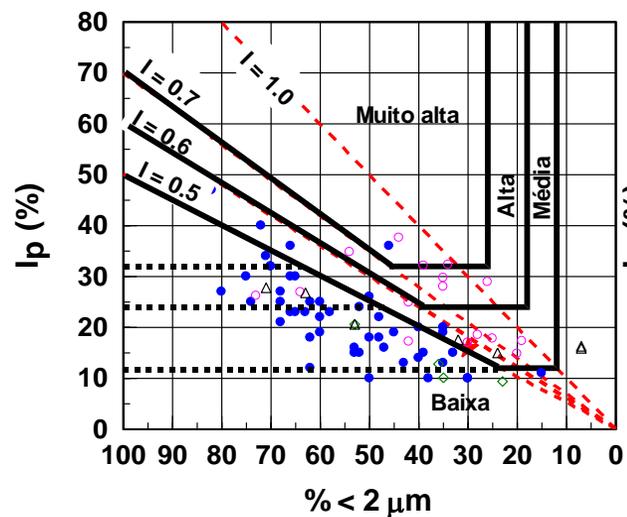
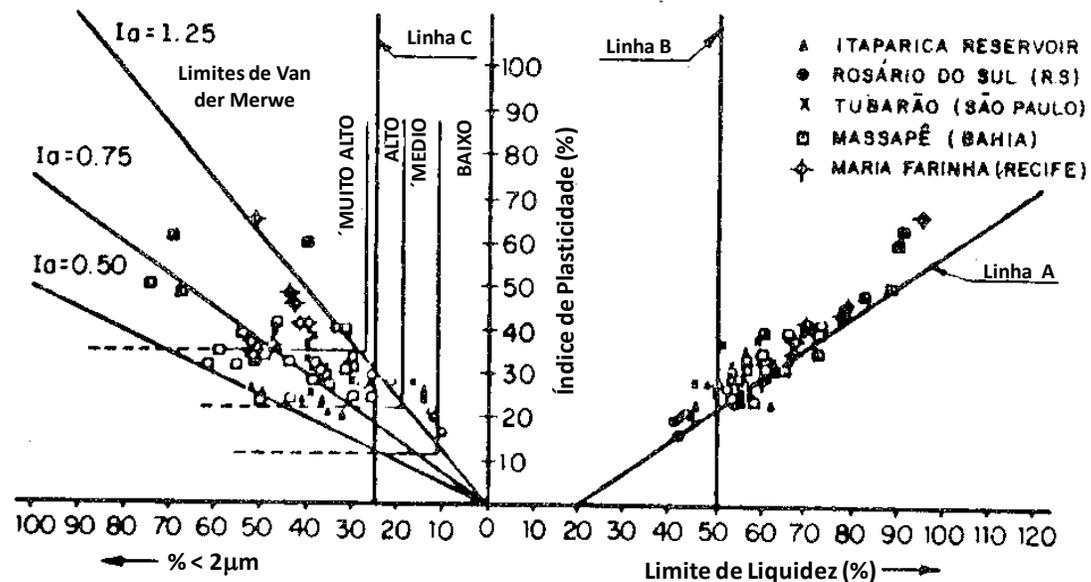
baseado em Seed et al, 1962

## Como Os Solos Potencialmente Expansivos

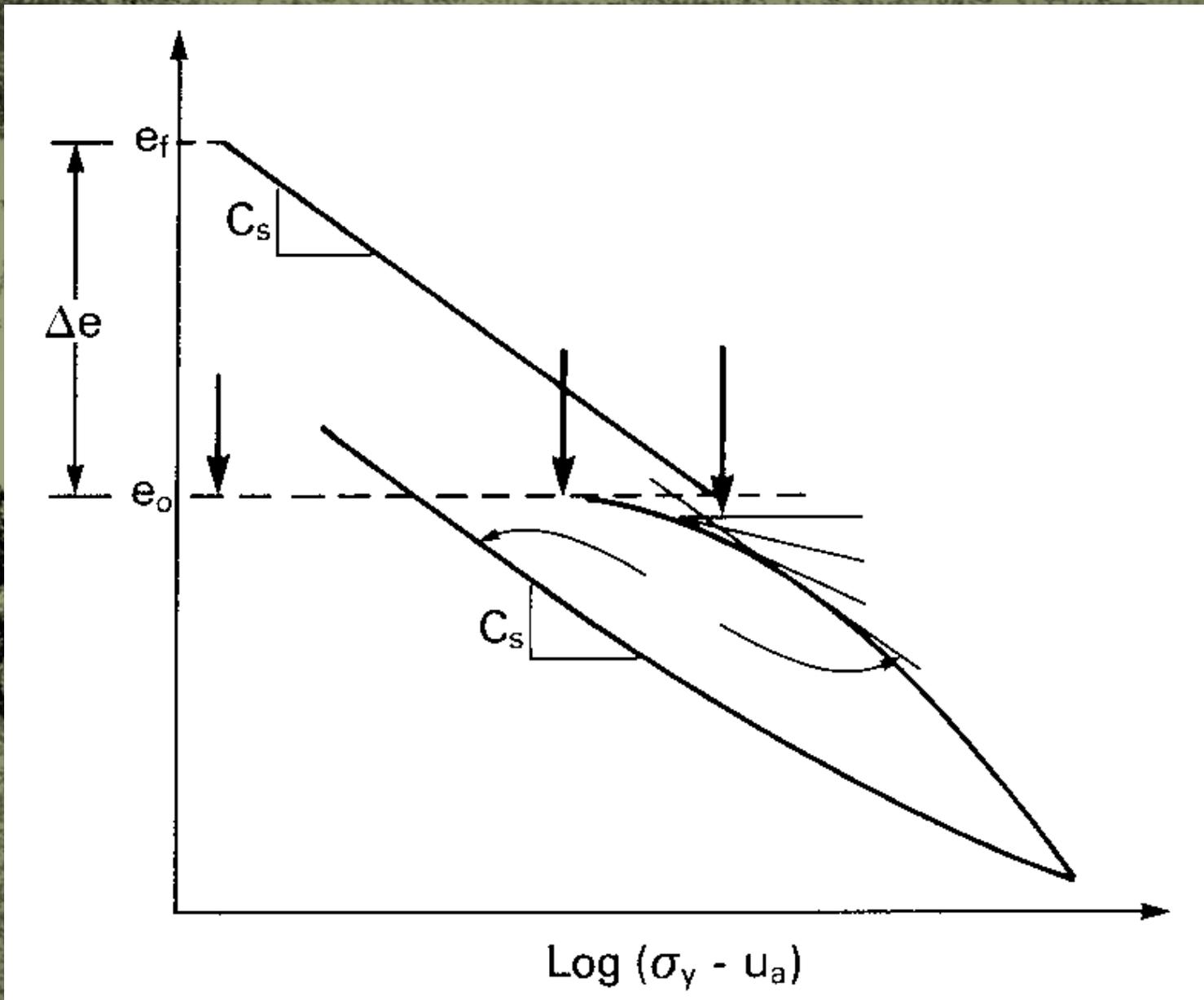
**Seed et al (1962) mencionam expressamente que é impossível desenvolver uma relação confiável entre dados de classificação de solos e o comportamento mecânico (quantitativo) do mesmo. Desta forma, não é recomendável utilizar sistemas de classificação baseados em ensaios de caracterização para quantificar o comportamento do solo em condições de campo.**

**Porém.....**

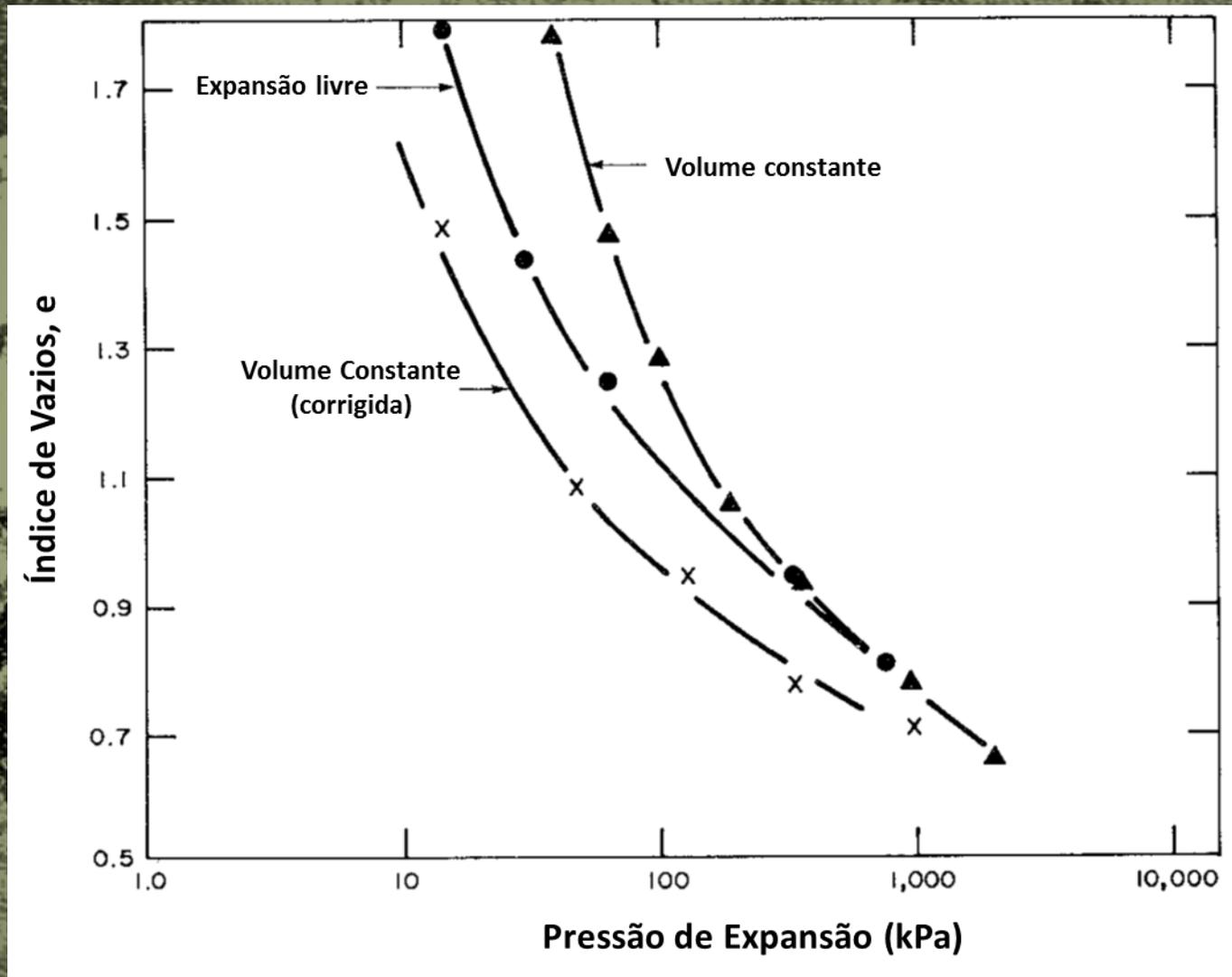
# Classificação dos Solos Potencialmente expansivos



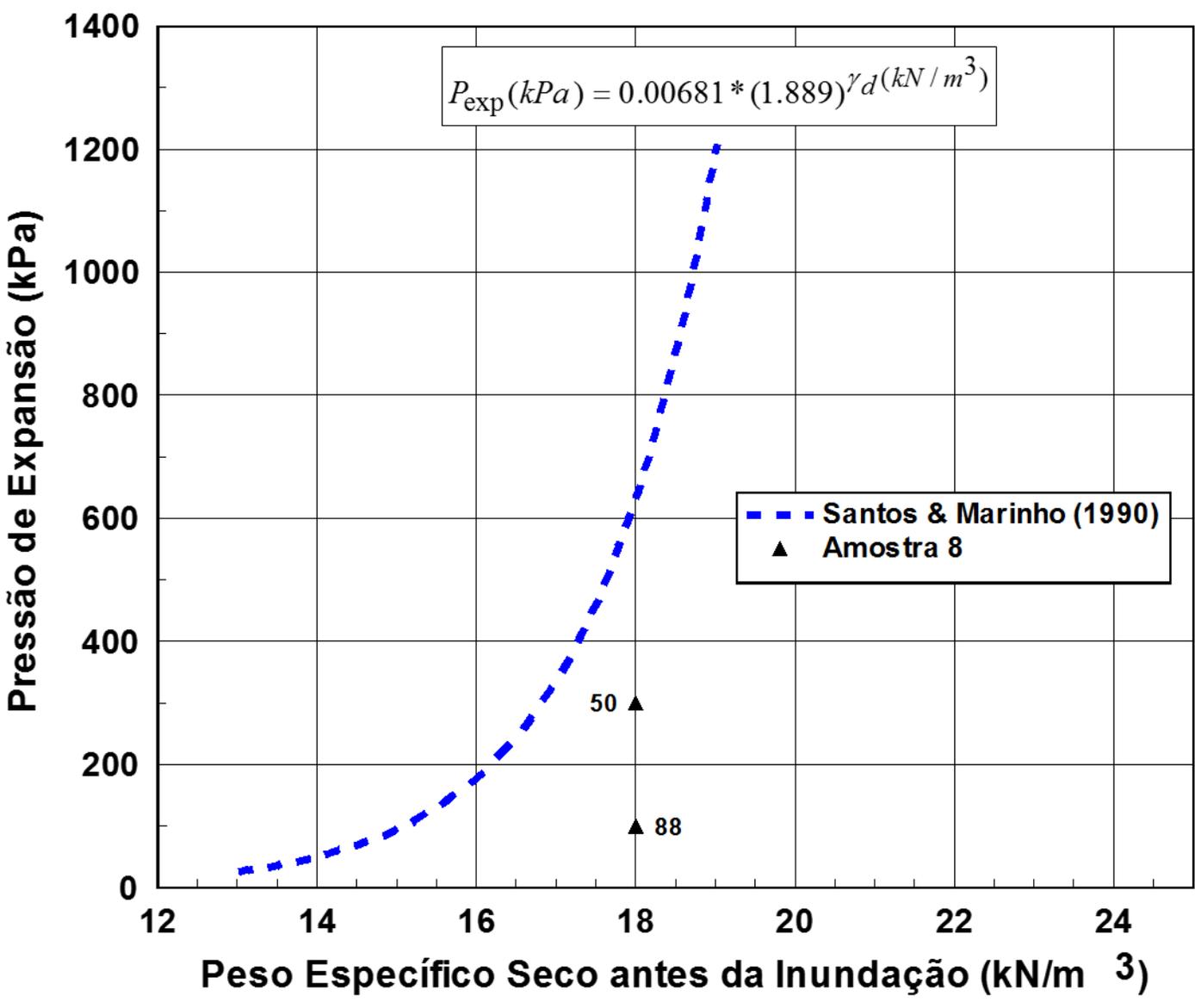
# Ensaio Edométrico em Solos Potencialmente Expansivos



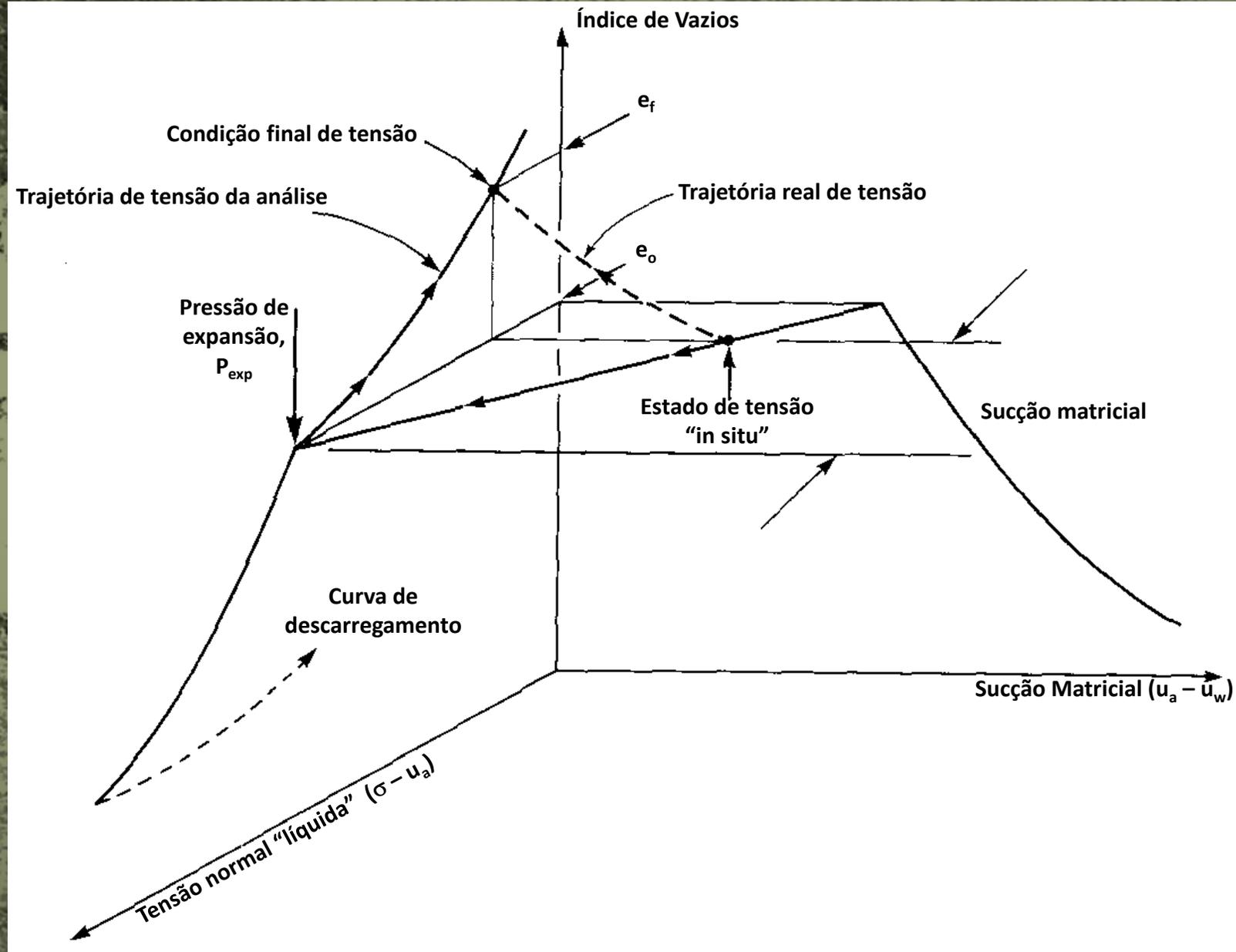
# Variação da Pressão de Expansão com o índice de Vazios e o Método de Determinação



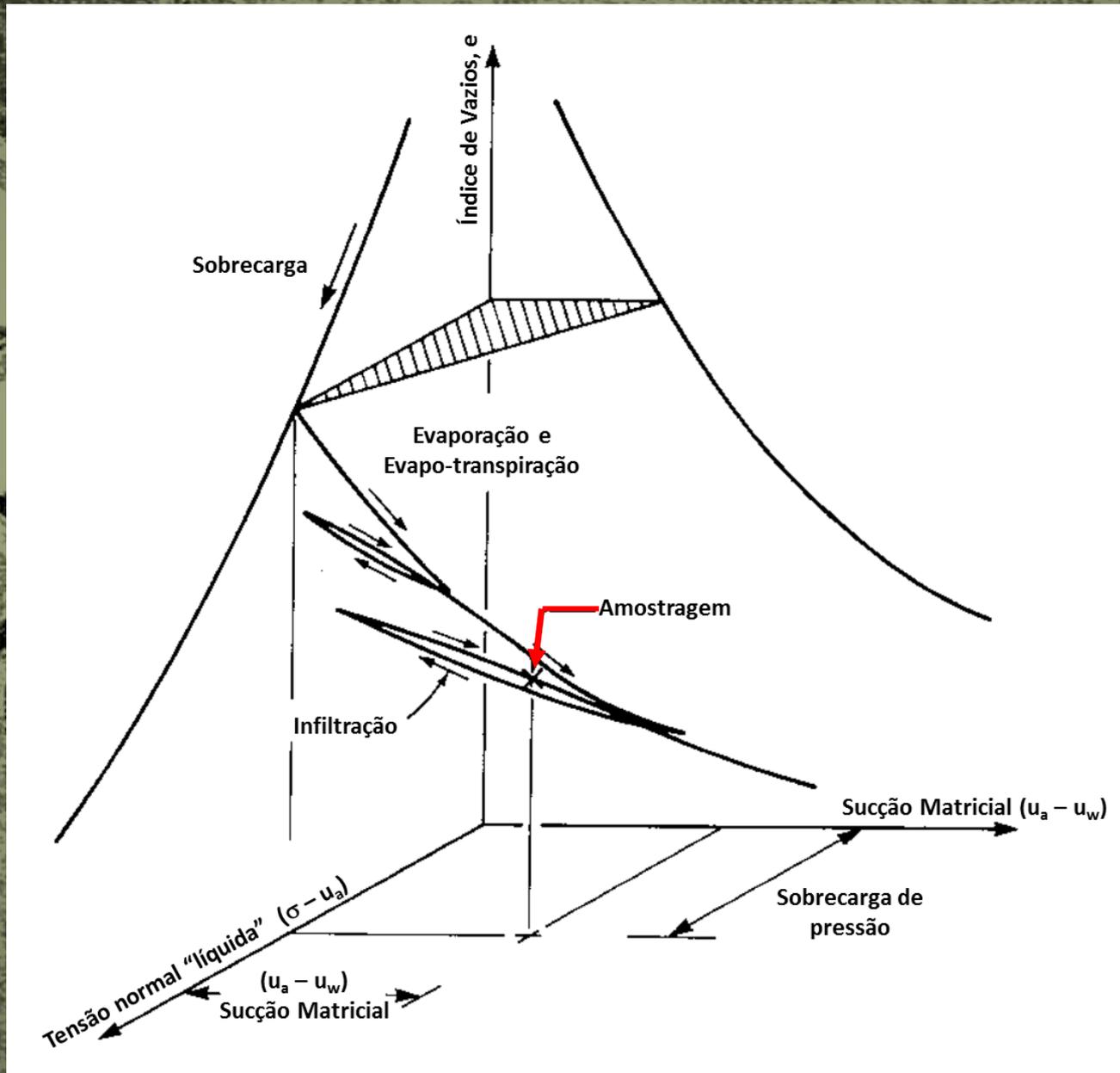
### Varição da Pressão de Expansão com a Densidade Seca



# Variação do Estado de Tensão (e sucção) e a Variação Volumétrica de Solos Potencialmente Expansivos

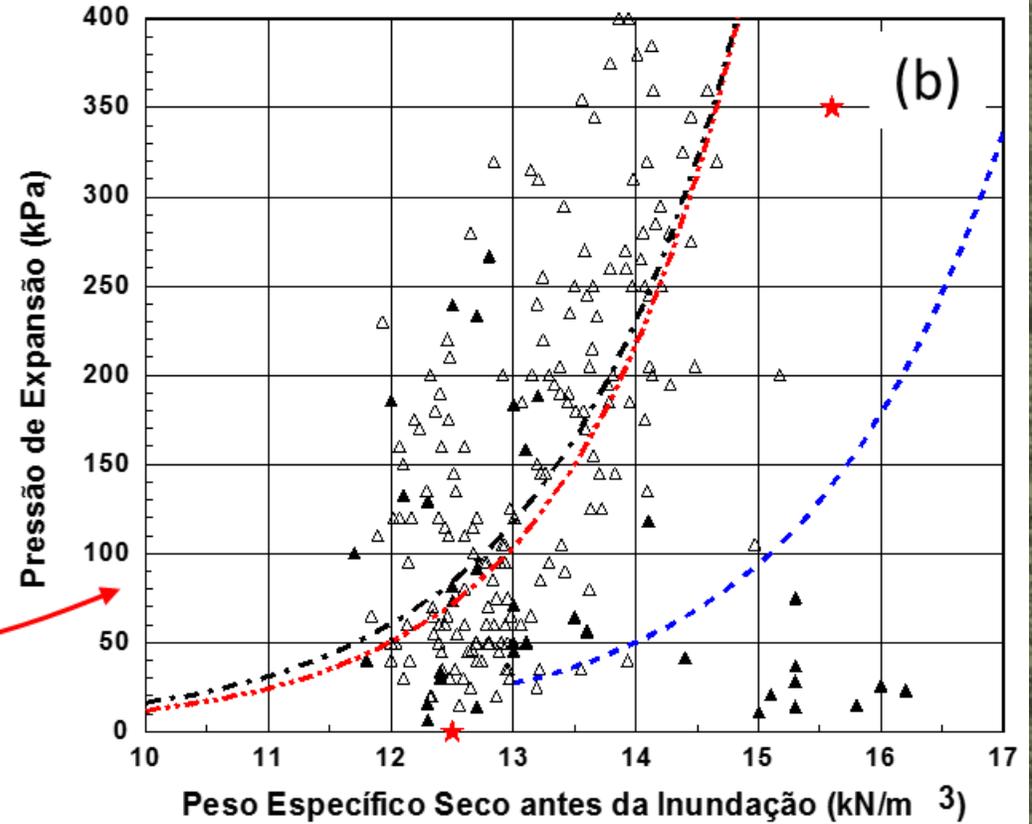
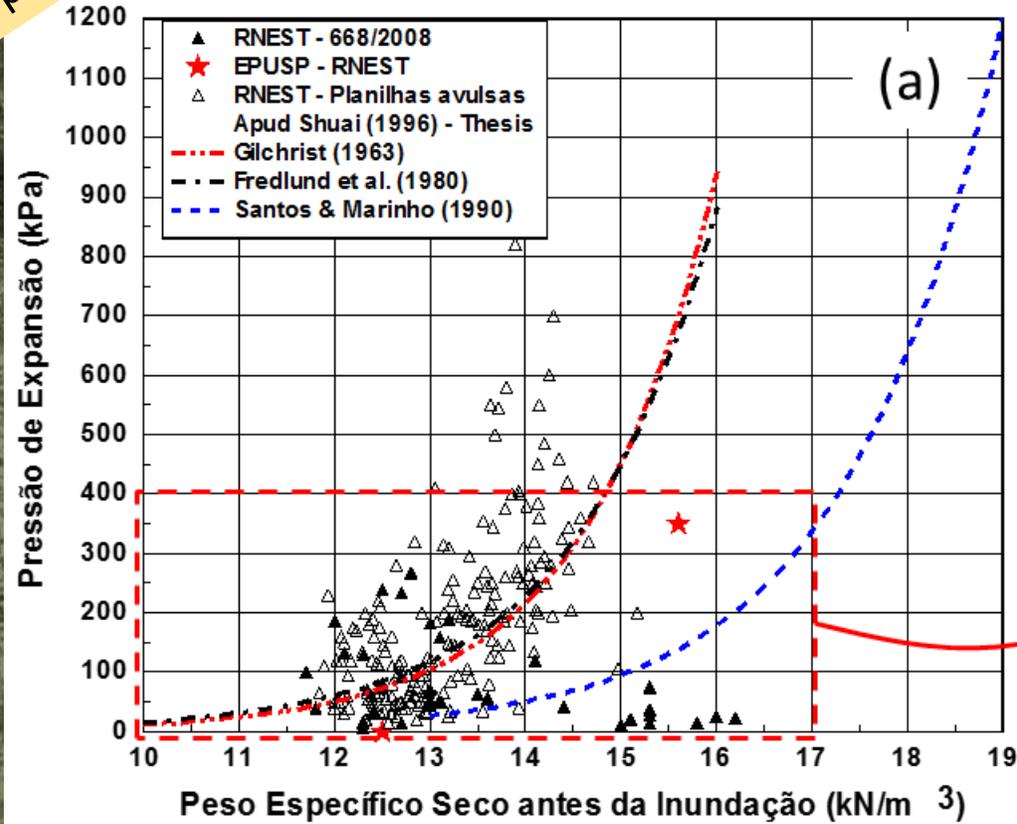


# Variação da Sucção e a Variação Volumétrica de Solos Potencialmente Expansivos



# Variação da Pressão de Expansão com a Densidade Seca para Vários Solos

Como interpretar?



# Amostra obtida na RENEST

C-09

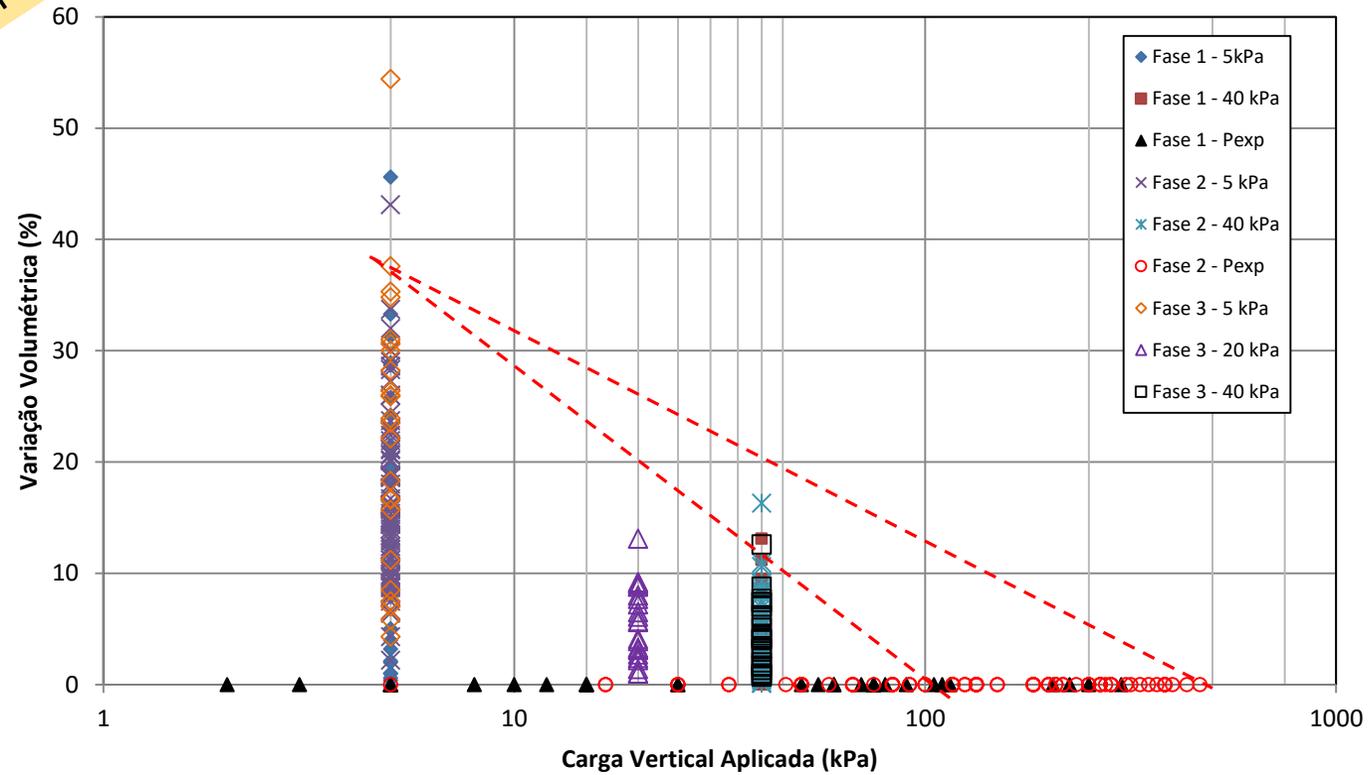


Bloco desagregado



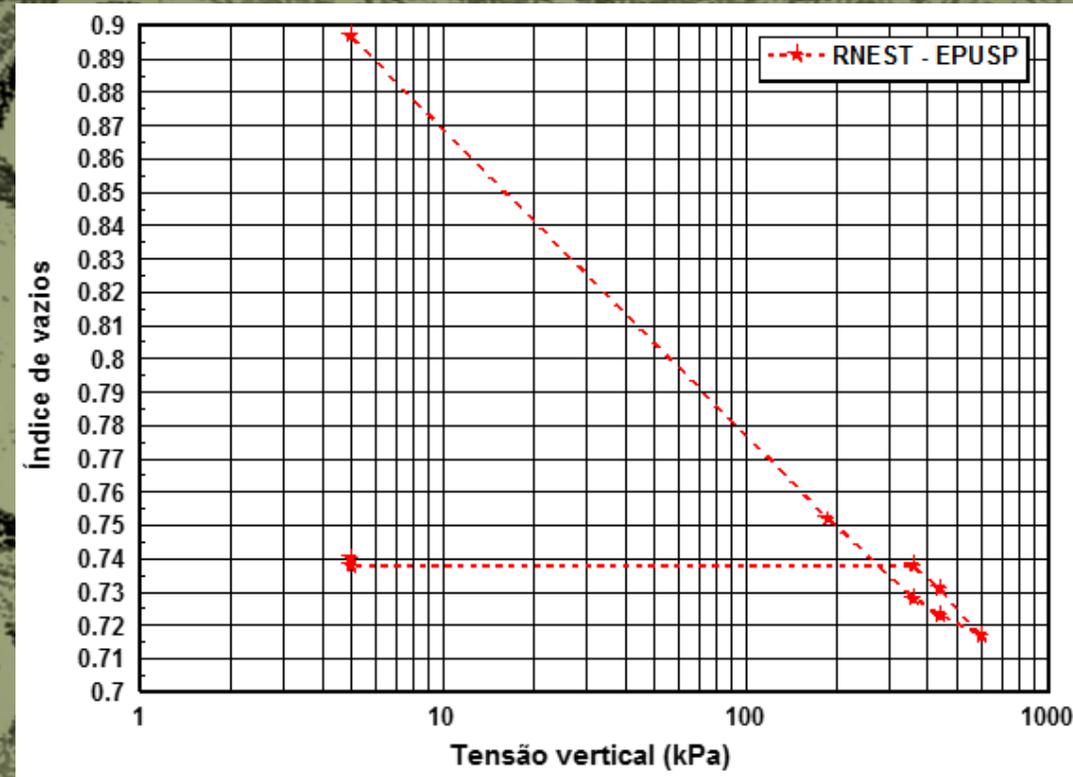
# Resultados de Ensaio com Amostras da RENEST

Como interpretar?

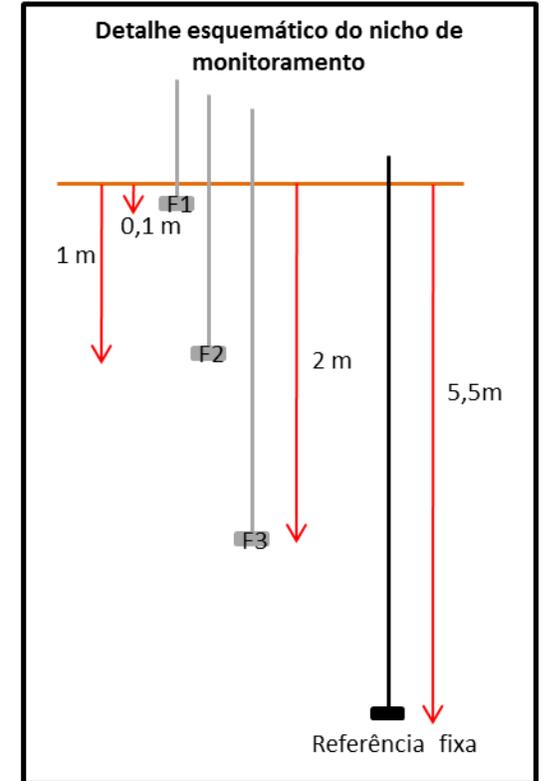
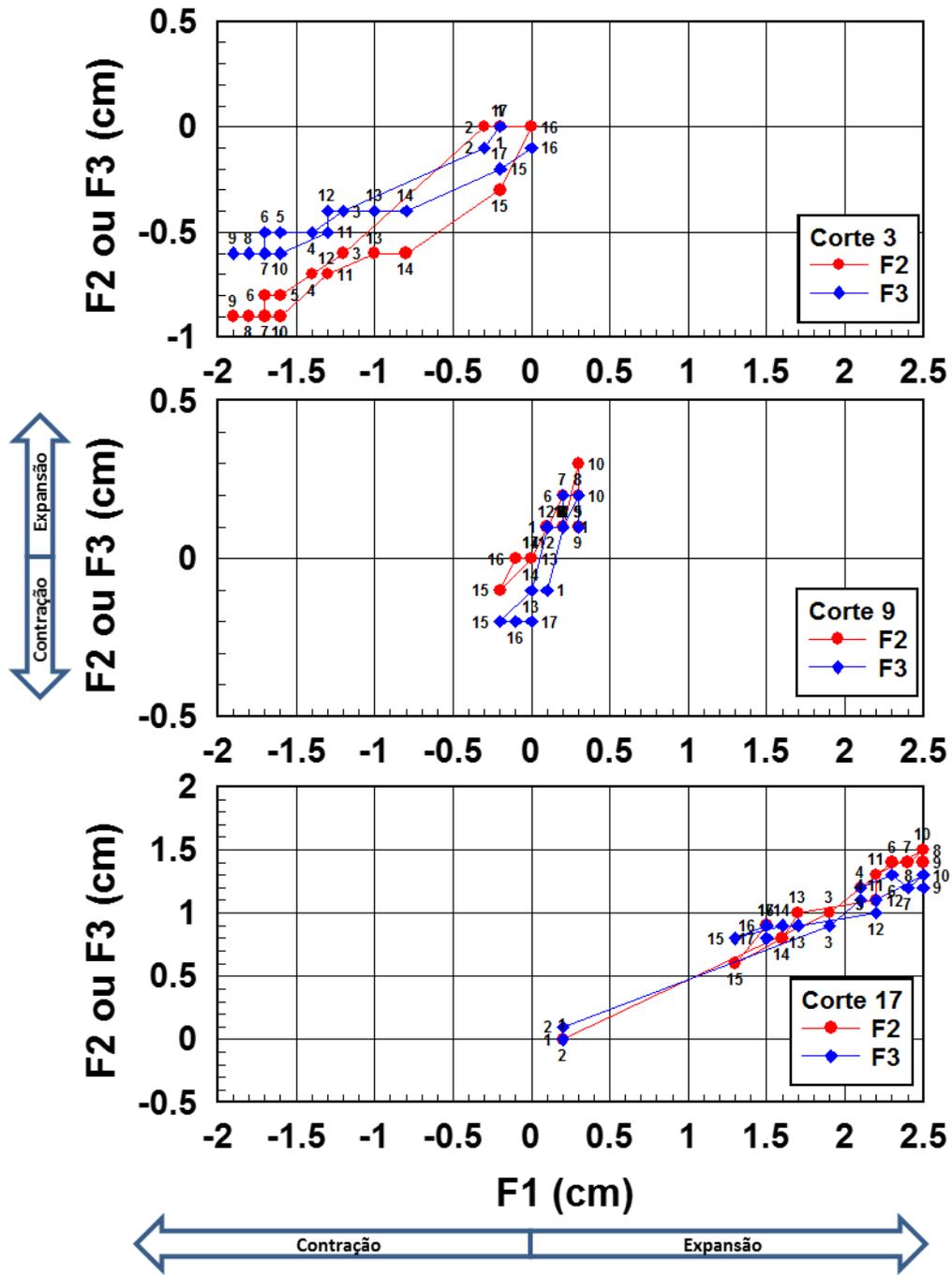


Dados do Relatório DE-5290.00-6100-115-IOA-010.

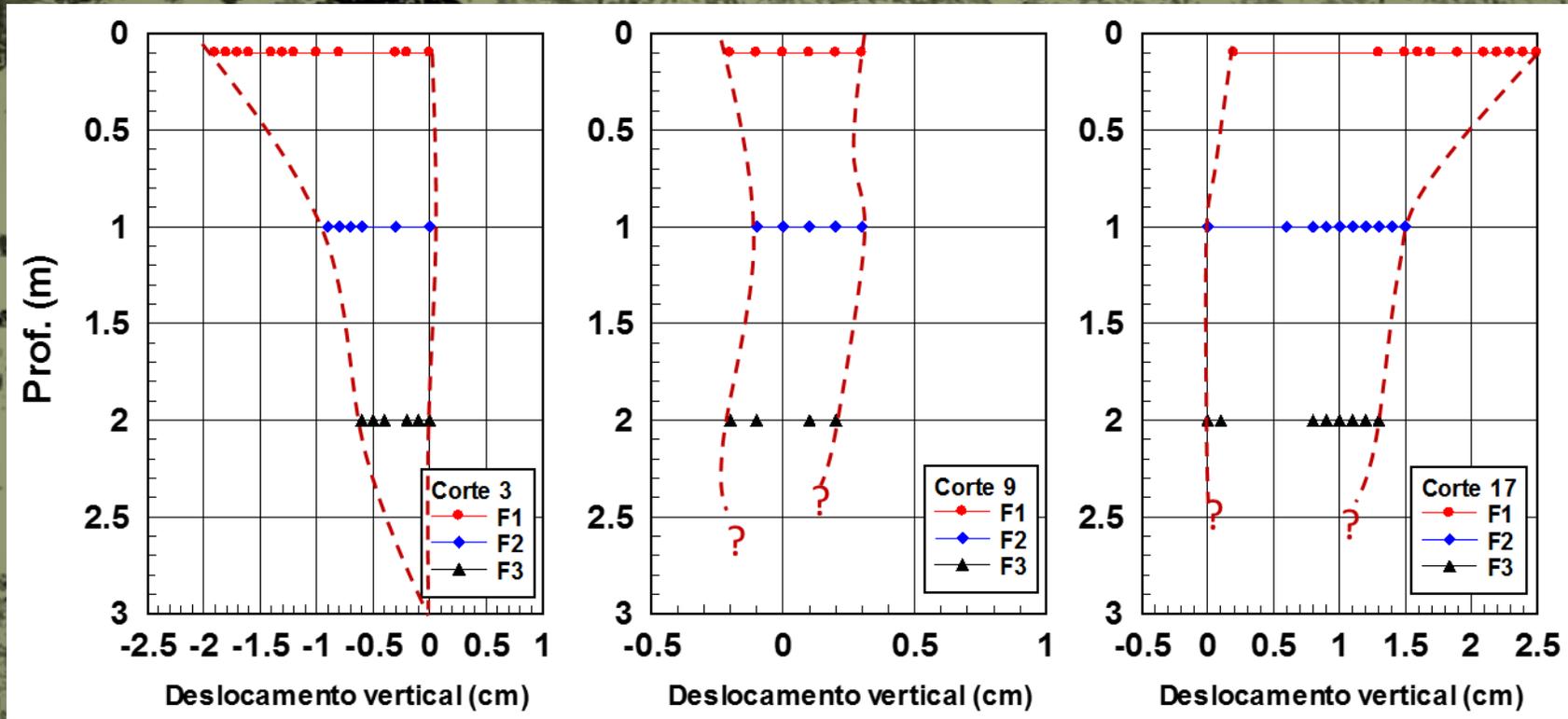
# Resultados de Ensaio com Amostras da RENEST



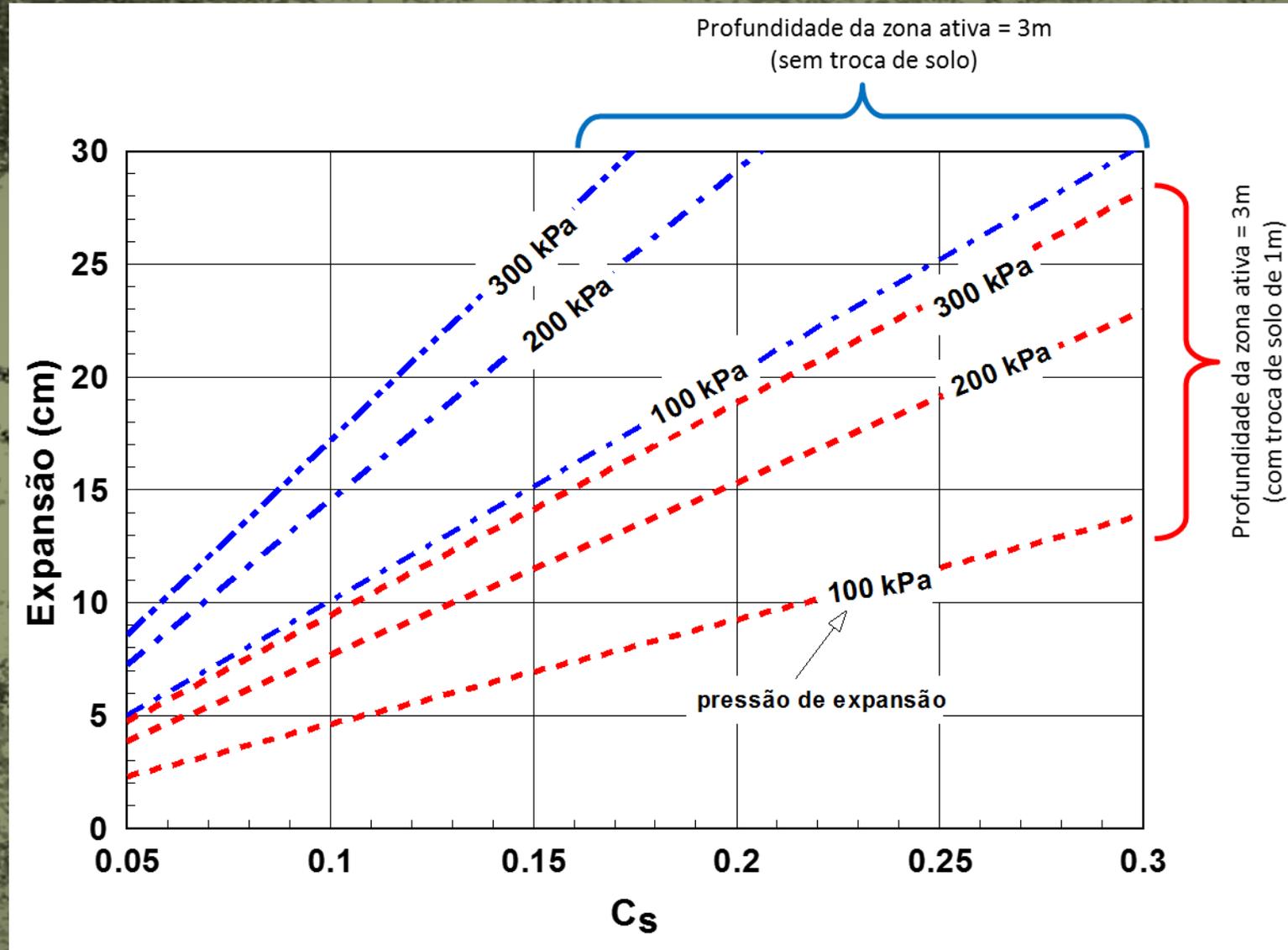
# Medições in situ - RENEST



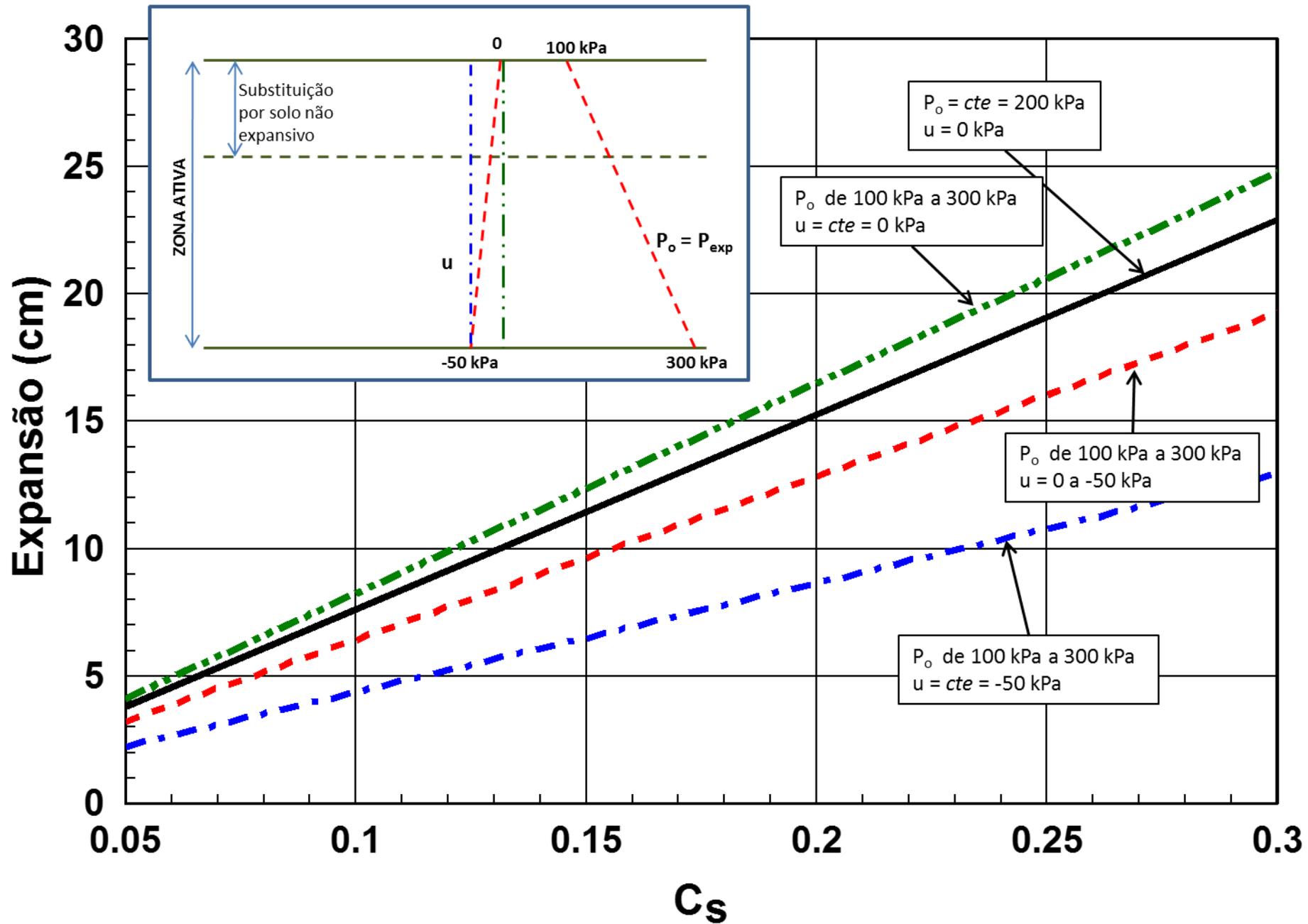
# Medições in situ - RENEST



# Previsão do Comportamento Expansivo



# Previsão do Comportamento Expansivo



## Estimativa da Expansão

Zona Ativa  
Variação de sucção  
Escavação  
Aterro  
Índice de expansão

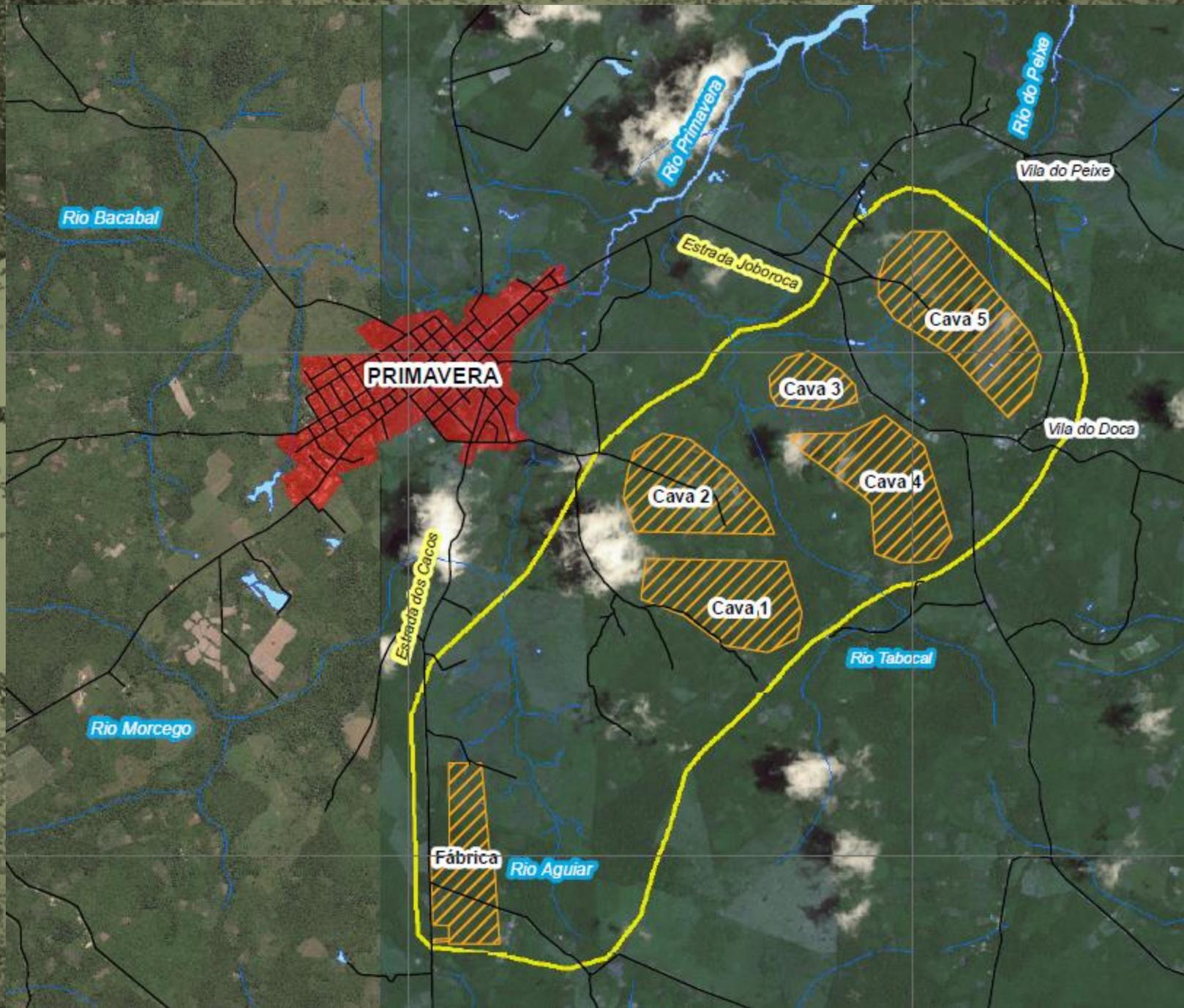
$$\Delta e = -C_s \log \left( \frac{P_f}{P_0} \right)$$

Os erros de estimativa estão associados aos seguintes aspectos:

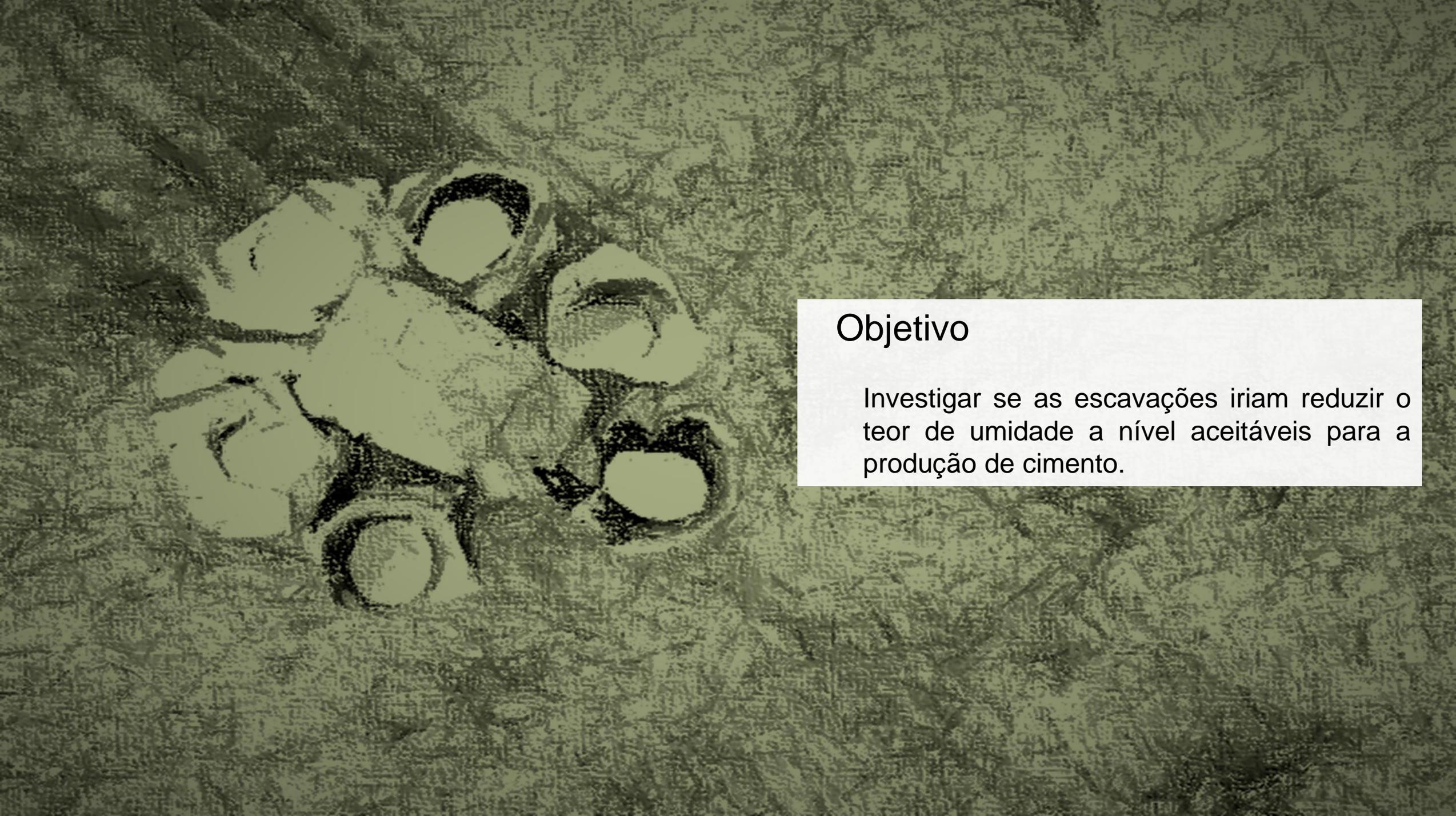
1. As previsões não levam em conta a expansão lateral que deve ocorrer.
2. Em solos muito fraturados a previsão fica bastante comprometida.
3. Erro na estimativa da zona ativa.
4. Qualidade e representatividade dos parâmetros obtidos.

# Fluxo em meio não saturado e uma interpretação da curva de retenção para uma Mina de Calcário





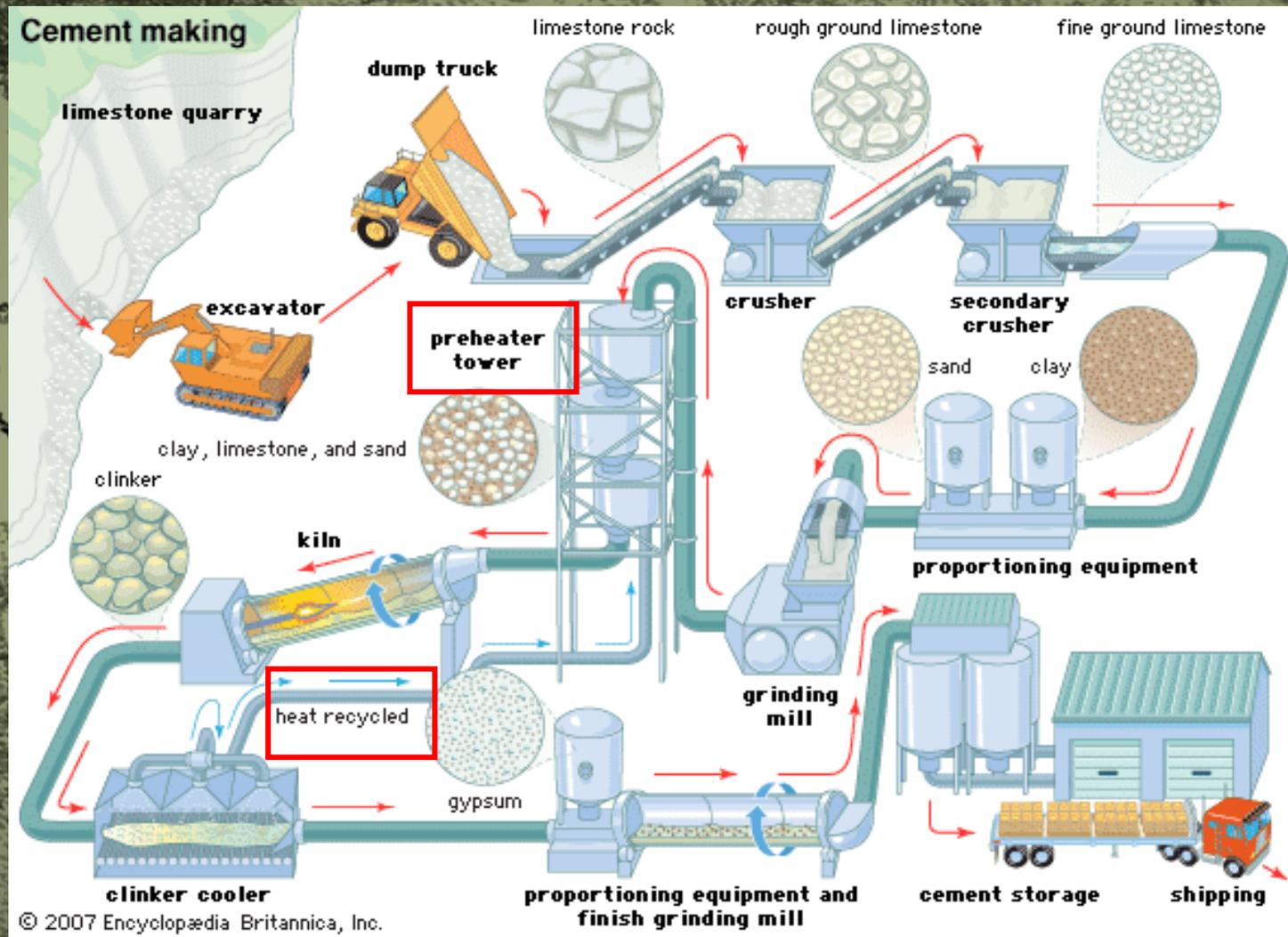
RIMA  
Projeto Primavera  
PARÁ  
Votorantim  
CIMENTOS N/NE S/A.



## Objetivo

Investigar se as escavações iriam reduzir o teor de umidade a nível aceitáveis para a produção de cimento.

# O Processo



# Caracterização Hidrogeotécnica do Minério

POSIÇÃO DAS AMOSTRAS EM RELAÇÃO ÀS MARGAS	SONDAGEM	AMOSTRA	PROFUNDIDADE (m)	DESCRIÇÃO TÁTIL E VISUAL DO CALCÁRIO (fornecida)			
				Granulometria	Cores	Porosidade	Dureza
ACIMA DAS MARGAS	FRP-516	CT 01	12,20 a 12,35	fino	cinza claro		duro
		CT 02	16,83 a 16,98	médio	cinza escuro	poroso	duro
		CT 03	19,20 a 19,36	médio a grosso	cinza escuro	poroso	duro
		CT 04	22,93 a 23,08	médio a grosso	cinza escuro	c/ fósseis	duro
	FRP-484	CT 06	12,50 a 12,65	fino	cinza escuro	raros fósseis	duro
		CT 07	17,75 a 17,90	médio a grosso	cinza everdeado		
		CT 08	21,65 a 21,80	médio a grosso	cinza claro	c/ fósseis	duro
	FRP-522	CT 11	11,16 a 11,31	fino	cinza claro	raros fósseis	duro
		CT 12	20,05 a 20,20	médio a grosso	cinza escuro	c/ fósseis	duro
	FRP-519	CT 16	12,40 a 12,55	grosso	cinza amarelado	poroso fossilífero	duro
		CT 17	27,70 a 27,86	medio a grosso	cinza claro	c/ fósseis	duro
		CT 18	32,00 a 32,15	fino a médio	cinza claro	poroso	duro
	FRP-521	CT 19	15,70 a 15,85	fino	cinza amarelado		duro a friável
		CT 20	29,45 a 29,60	grosso	esbranquiçado	poroso c/ fósseis	duro
ENTRE AS MARGAS	FRP-484	CT 09	28,82 a 28,97	méido	cinza claro	c/ fósseis	duro
		CT 10	29,97 a 30,12	médio a grosso	esbranquiçado	fossilífero	duro
	FRP-522	CT 13	28,27 a 28,42	fino a médio	cinza claro	raros fósseis	duro
		CT 14	30,91 a 31,05	medio a grosso	cinza claro	poroso fossilífero	duro
ABAIXO DAS MARGAS	FRP-516	CT 05	36,37 a 36,52	fino	cinza claro	algo laminado	
	FRP-522	CT 15	37,00 a 37,15	medio a grosso	cinza escuro	fossilífero	duro

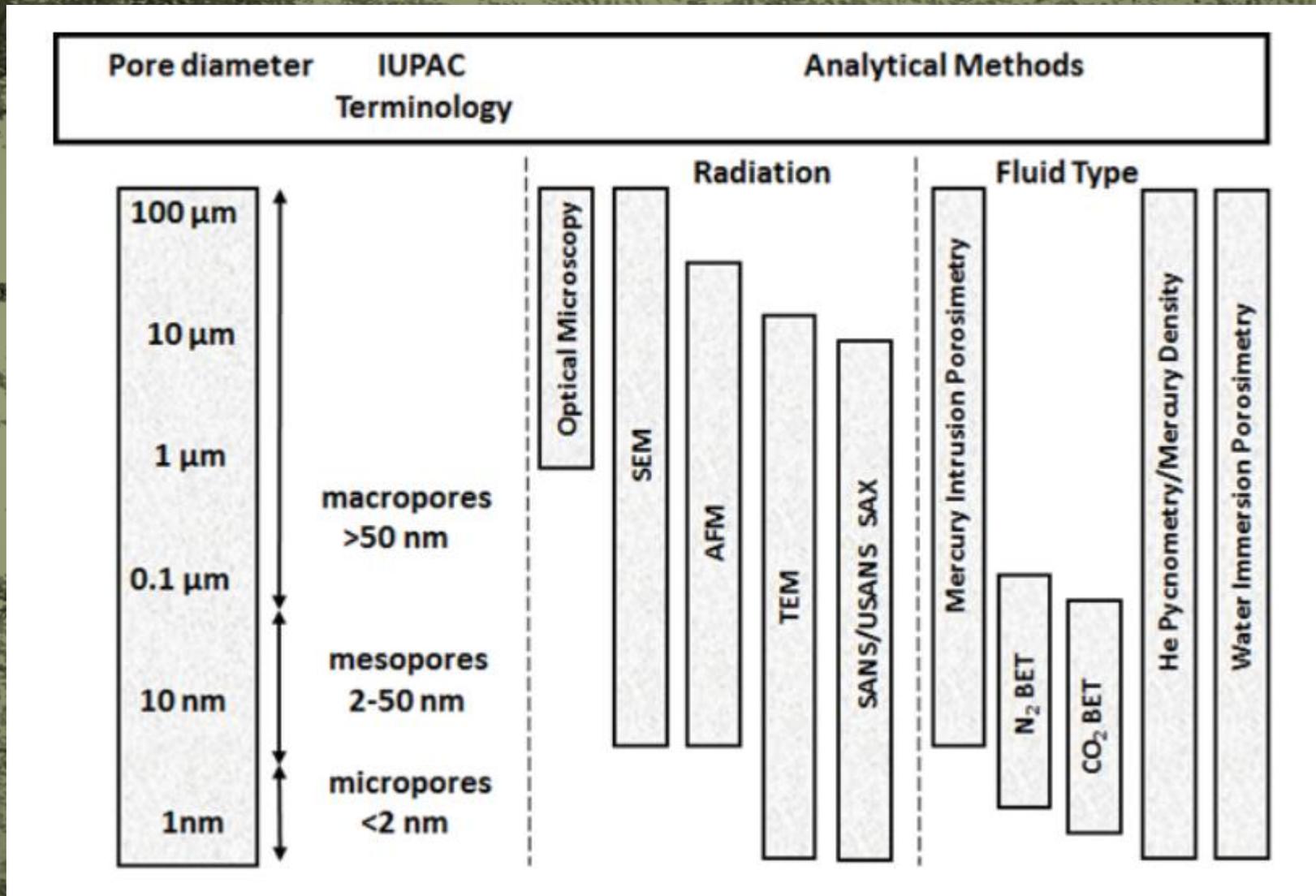
ACM

ENM

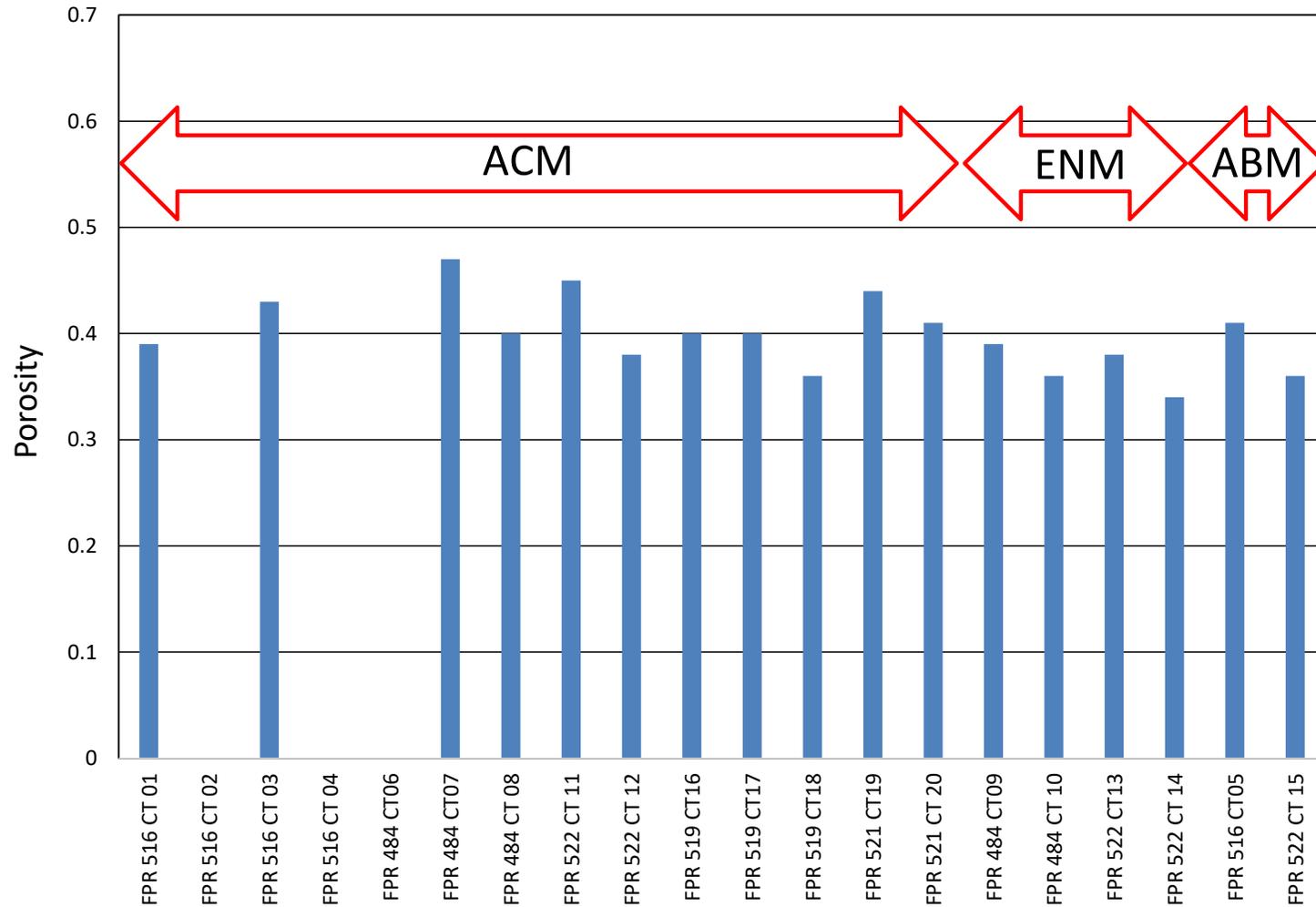
ABM

Marga é um tipo de rocha sedimentar composta principalmente de calcita e argilas (35 a 60%). A calcita confere ao material uma cor esbranquiçada, com tons que podem variar muito de acordo com as diferentes proporções e composições de minerais principal

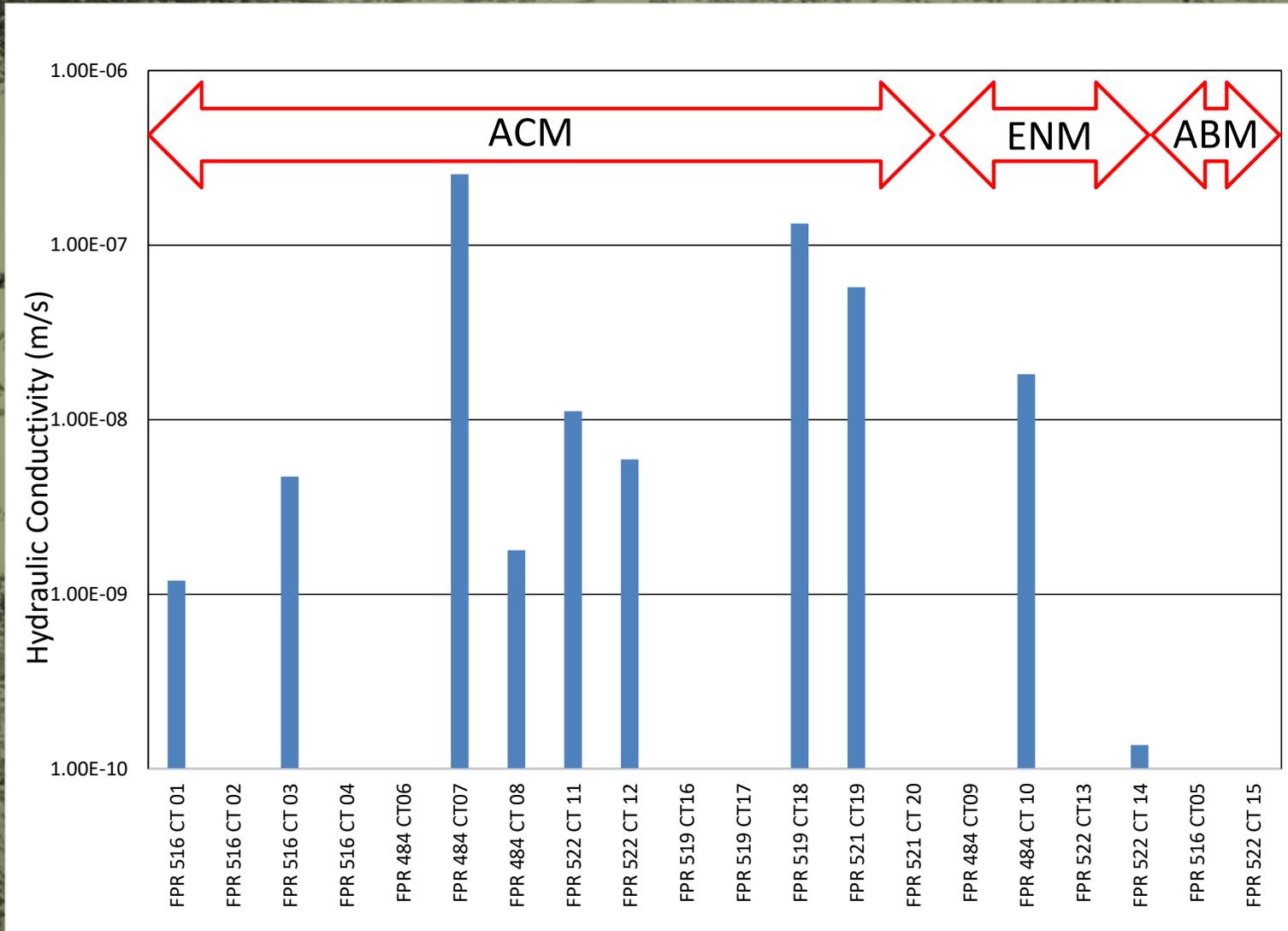
# Métodos Usados para a Determinação da Porosidade e Distribuição de Poros



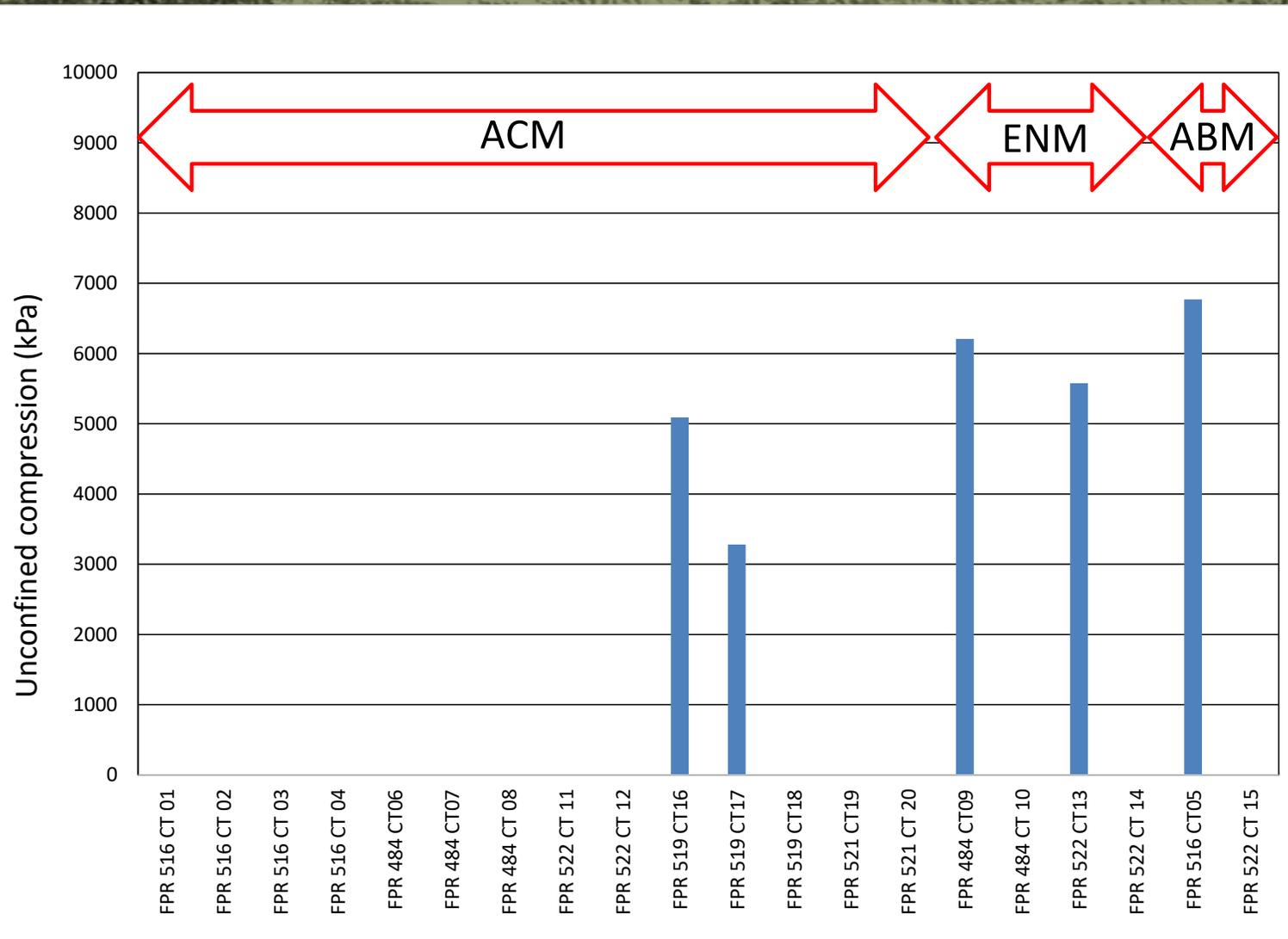
# Porosidades das amostras



# Condutividade Hidráulica



# Resistência a Compressão Simples

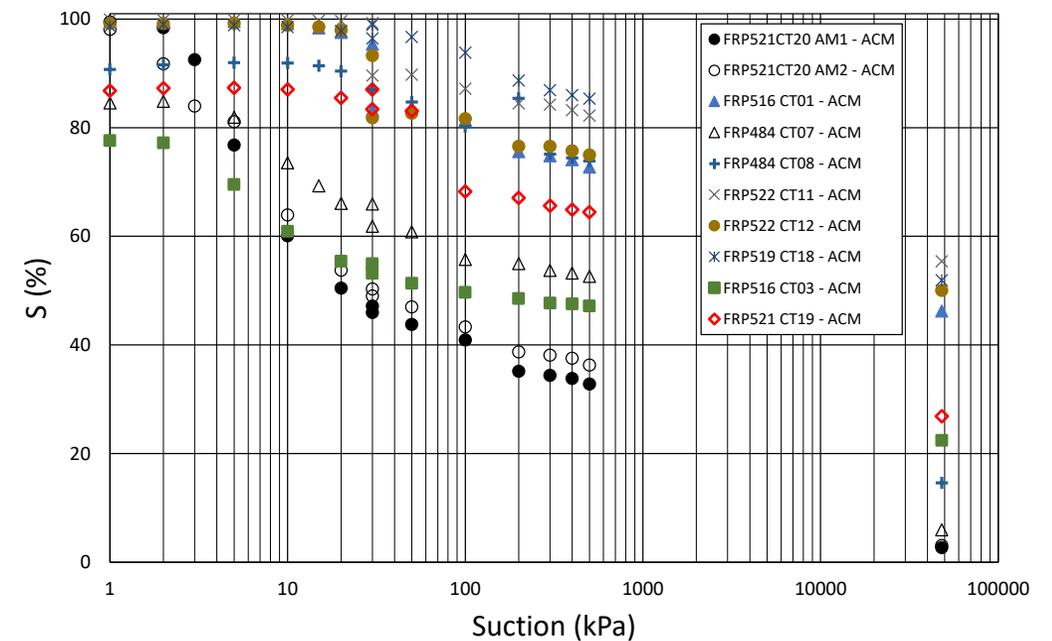
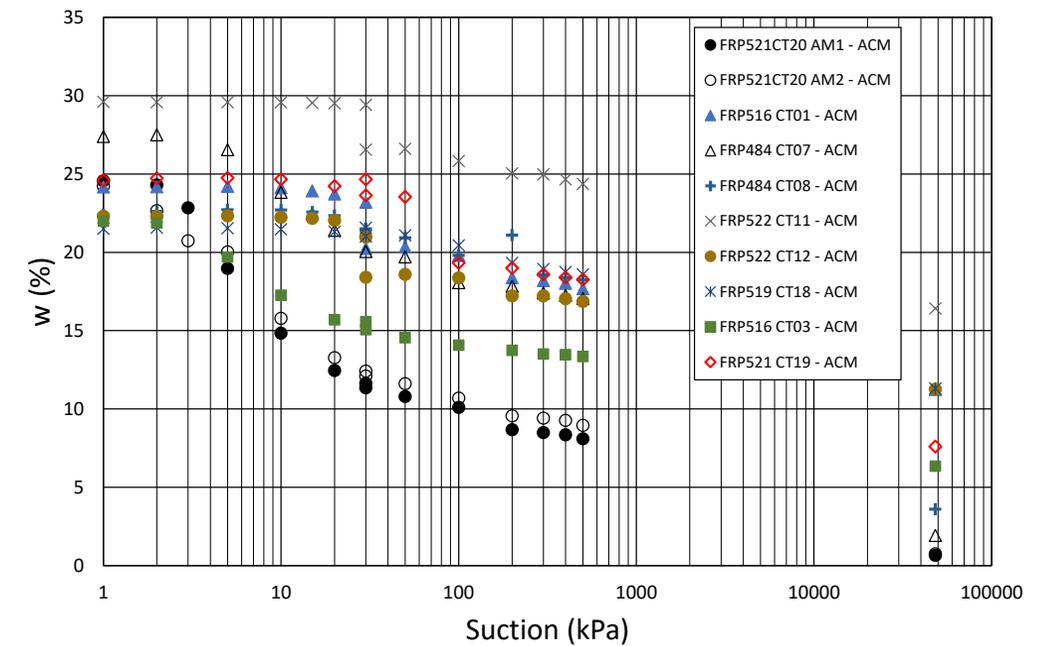


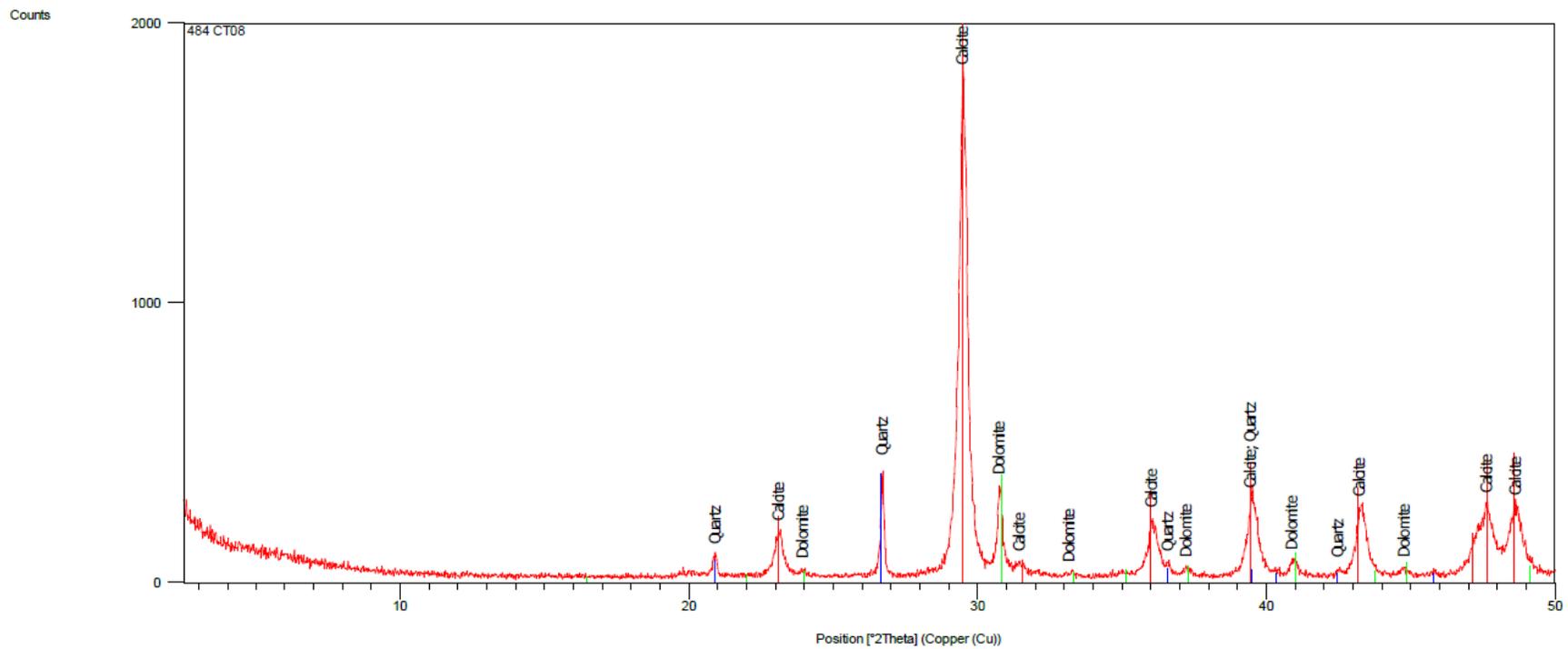
# Curvas de Retenção para os materiais acima das margas



Observa-se que:

- O teor de umidade residual é elevado para o caso específico.
- Uma escavação não iria fazer drenar a água e nem ela sairia por bombeamento em poços.





**Difratograma da amostra 484 CT08**

Data from LCT (2015)



484 CT06



484 CT07



484 CT08



516 CT01



516 CT02



516 CT04



519 CT18



521 CT19



521 CT20



522 CT11



522 CT12



484 CT10 ENM

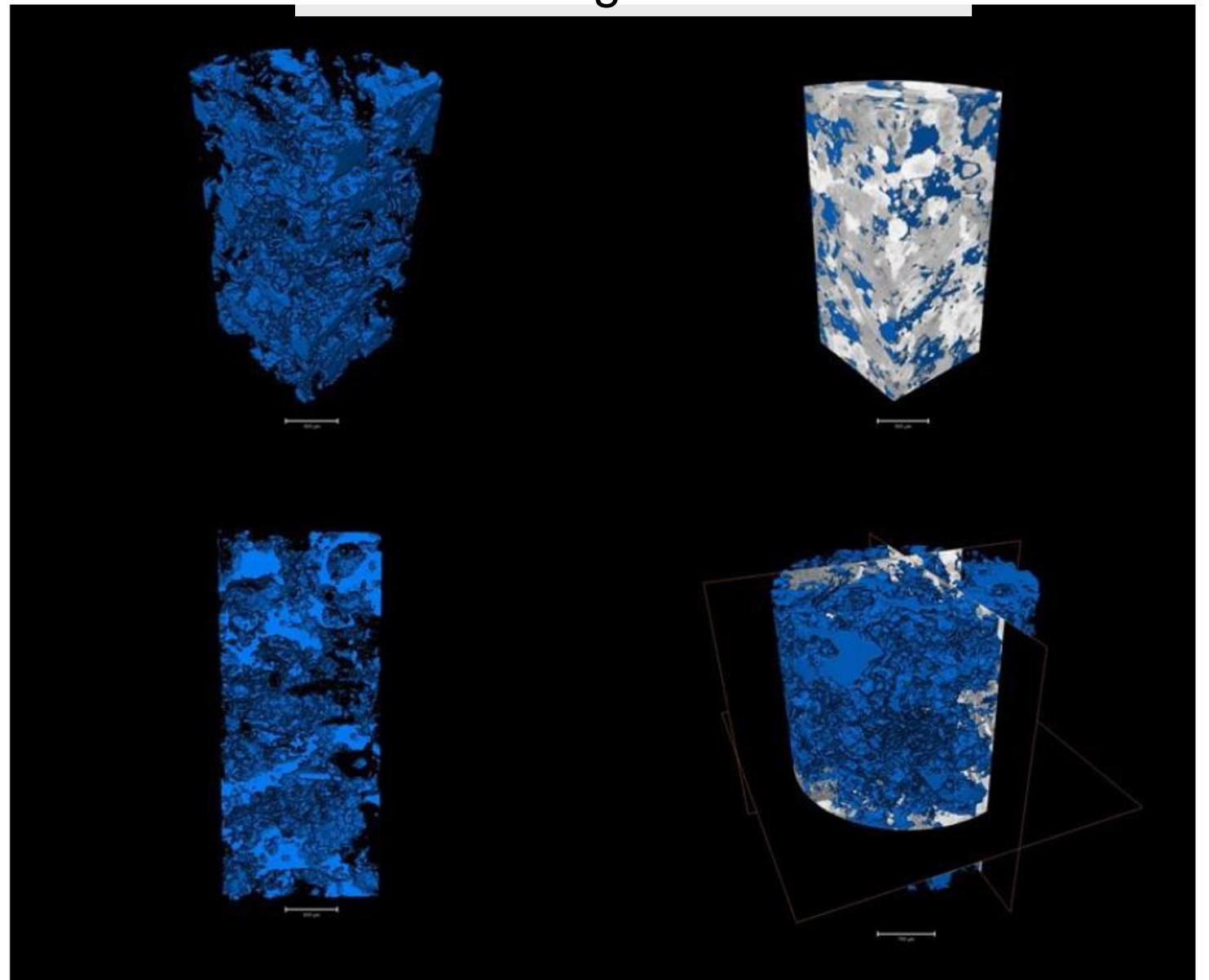


522 CT15 ABM

# Microtomografia de raio X

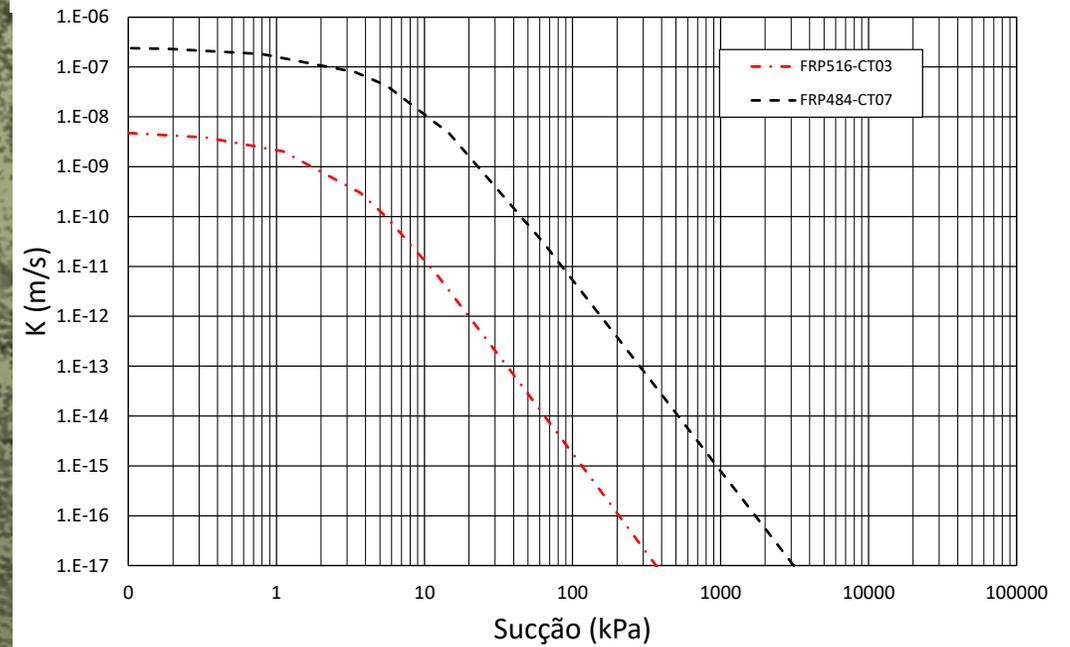
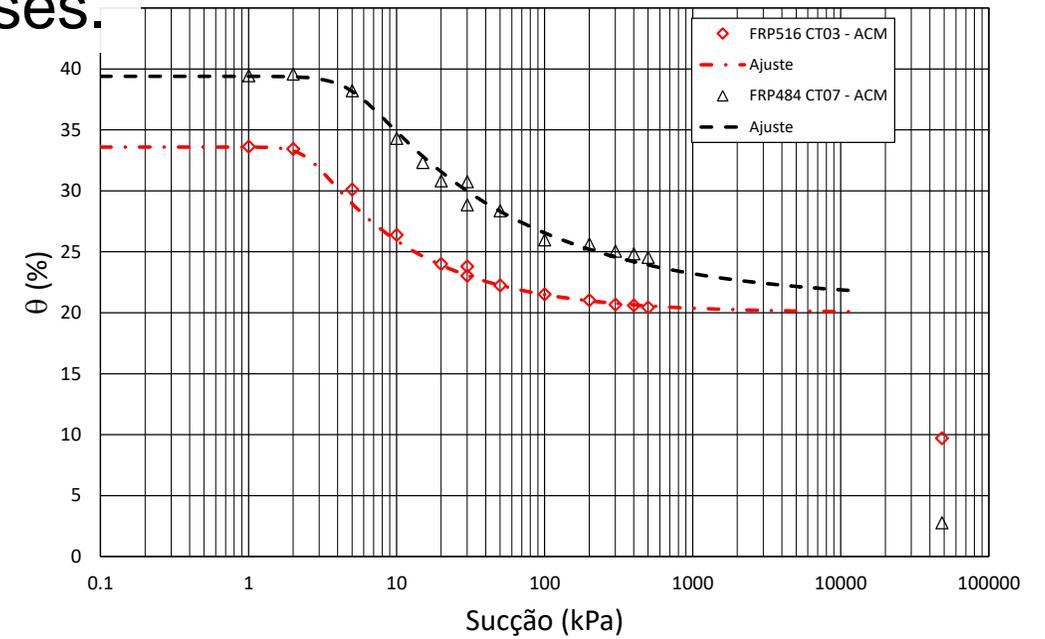


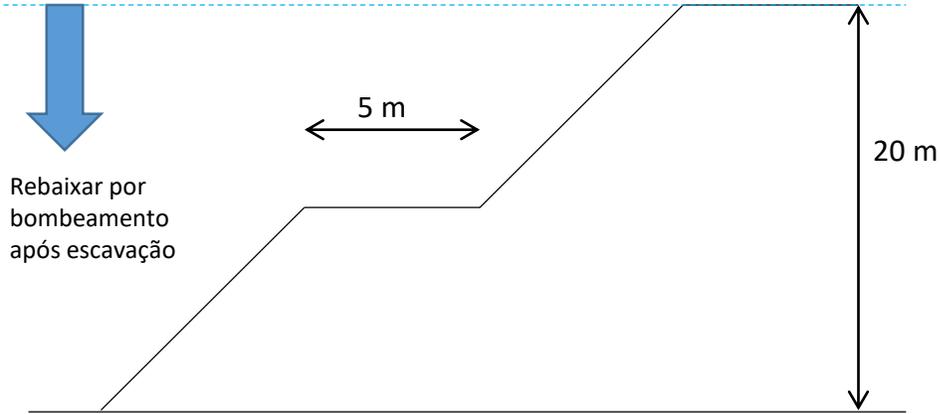
484 CT07



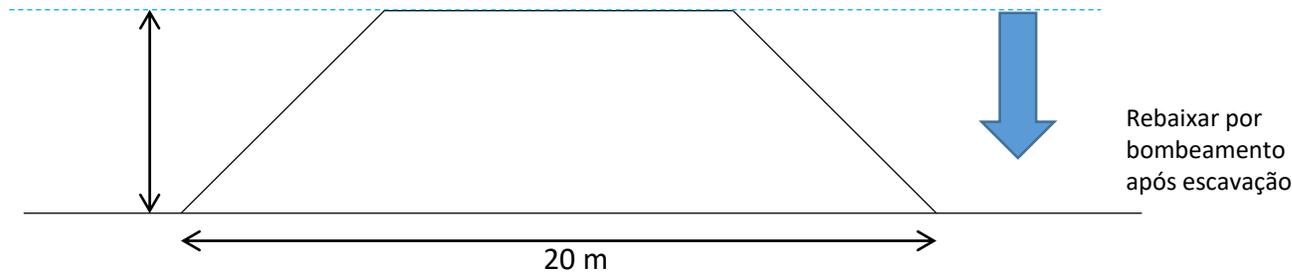
AMOSTRA FPR 484 CT 07

# Função de permeabilidade adotada nas análises.

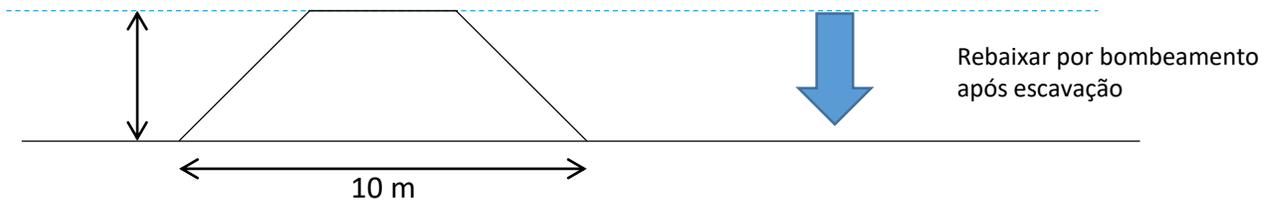




- um talude com ângulo geral de 20m de altura, base impermeável, com:
  - 45° de ângulo geral;
  - 2 bancadas de mesmo ângulo e 10m de altura cada;
  - 1 berma de 5m entre as duas bancadas; e
  - nível de água inicial no topo do talude (talude totalmente saturado).

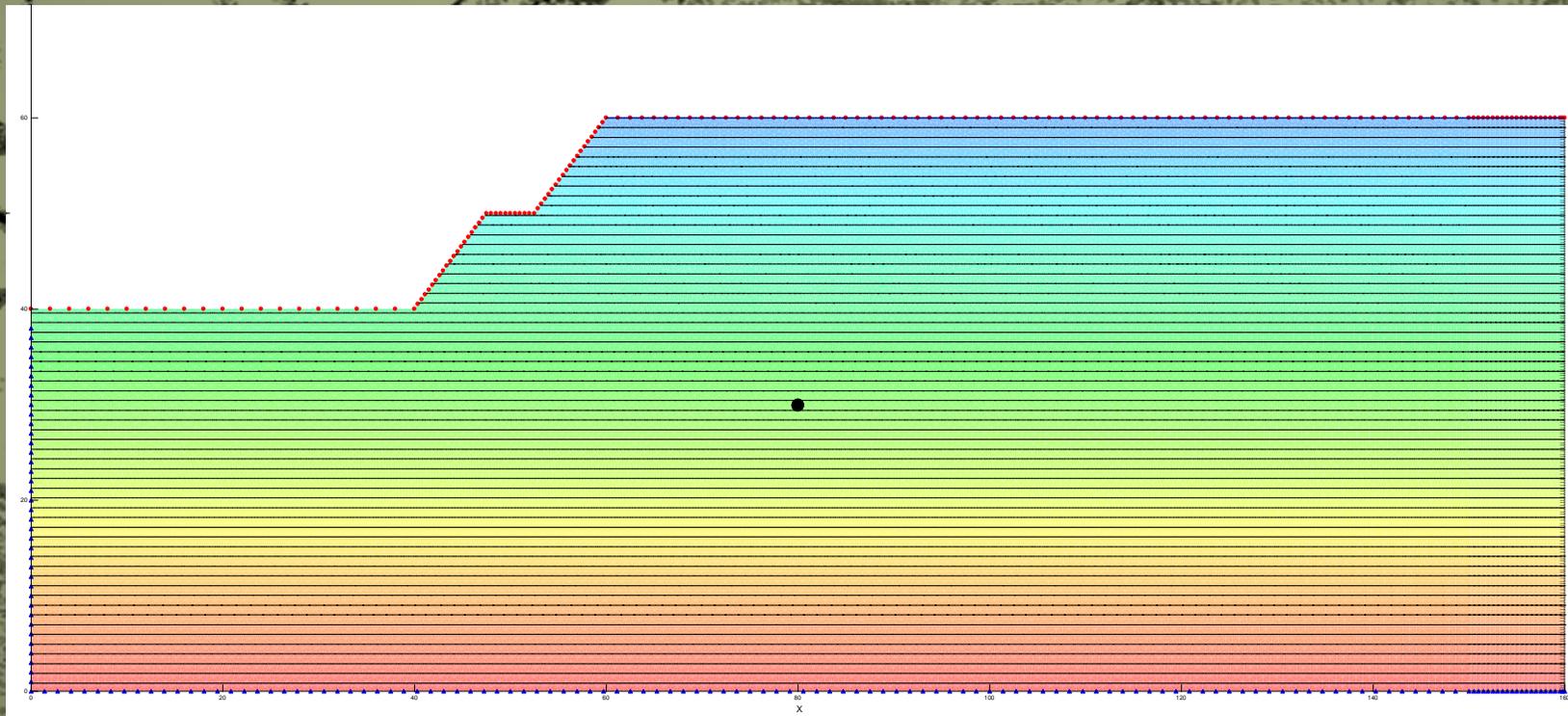


- uma "dama" com seção trapezoidal, base impermeável, isolada por escavações laterais, com:
  - geometria da seção:  $h=10\text{m}$ , largura de topo= $10\text{m}$ , largura da base= $20\text{m}$  e ângulo de face= $45^\circ$ ; e
  - nível de água inicial no topo da dama.



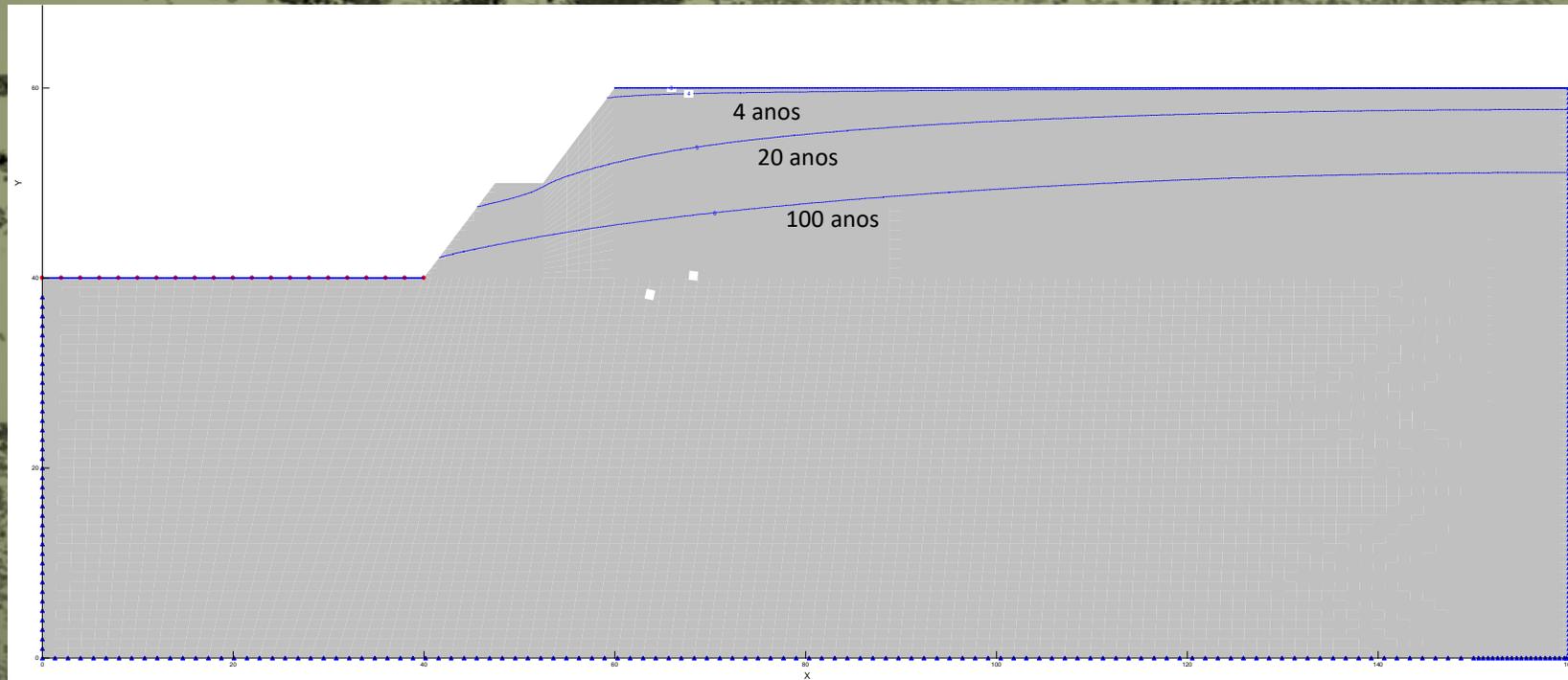
- uma "dama" trapezoidal, base impermeável, isolada por escavações laterais, com:
  - geometria da seção:  $h=5\text{m}$ , largura de topo= $5\text{m}$ , largura da base= $10\text{m}$  e ângulo de face= $45^\circ$ ; e
  - nível de água inicial no topo da dama.

Condição inicial – Modelo 1



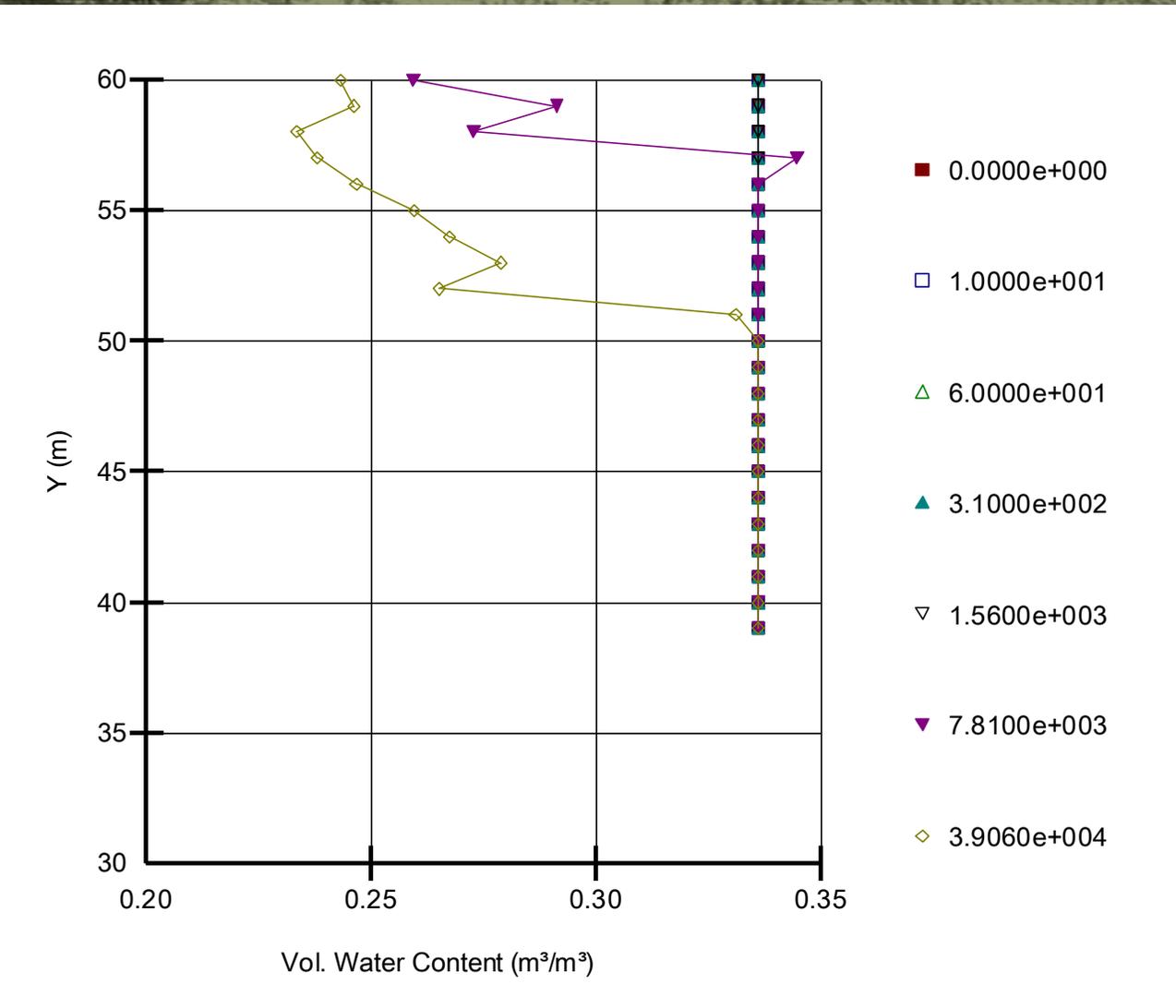
## Condição inicial – Modelo 1

$K_{\text{sat}} = 4.7 \cdot 10^{-9} \text{ m/s}$   
Curva de retenção da amostra – FRP516-CT03



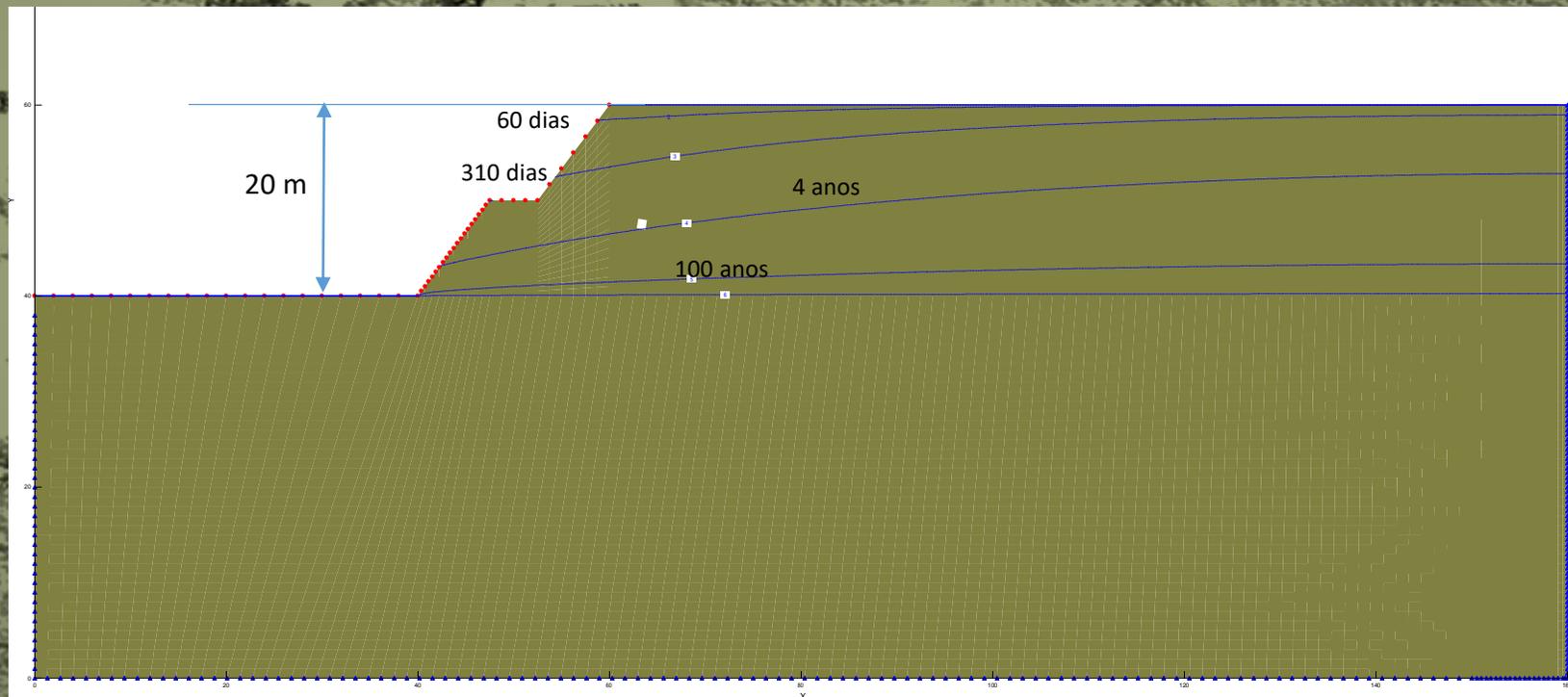
# Condição inicial – Modelo 1

$K_{sat} = 4.7 * 10^{-9} \text{ m/s}$   
Curva de retenção da amostra – FRP516-CT03



# Condição inicial – Modelo 1

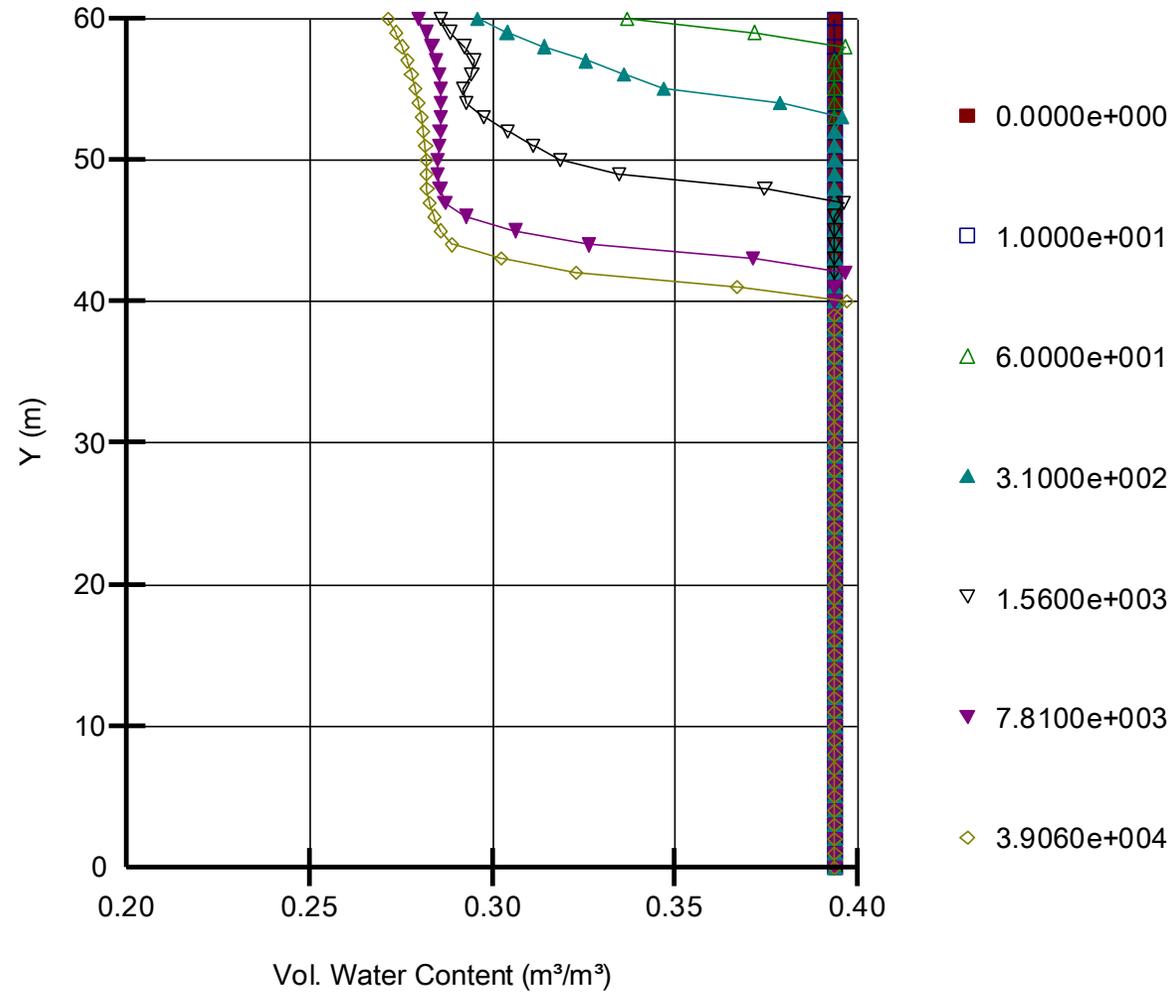
$K_{sat} = 2.5 \cdot 10^{-7} \text{ m/s}$   
Curva de retenção da amostra – FRP484-CT07



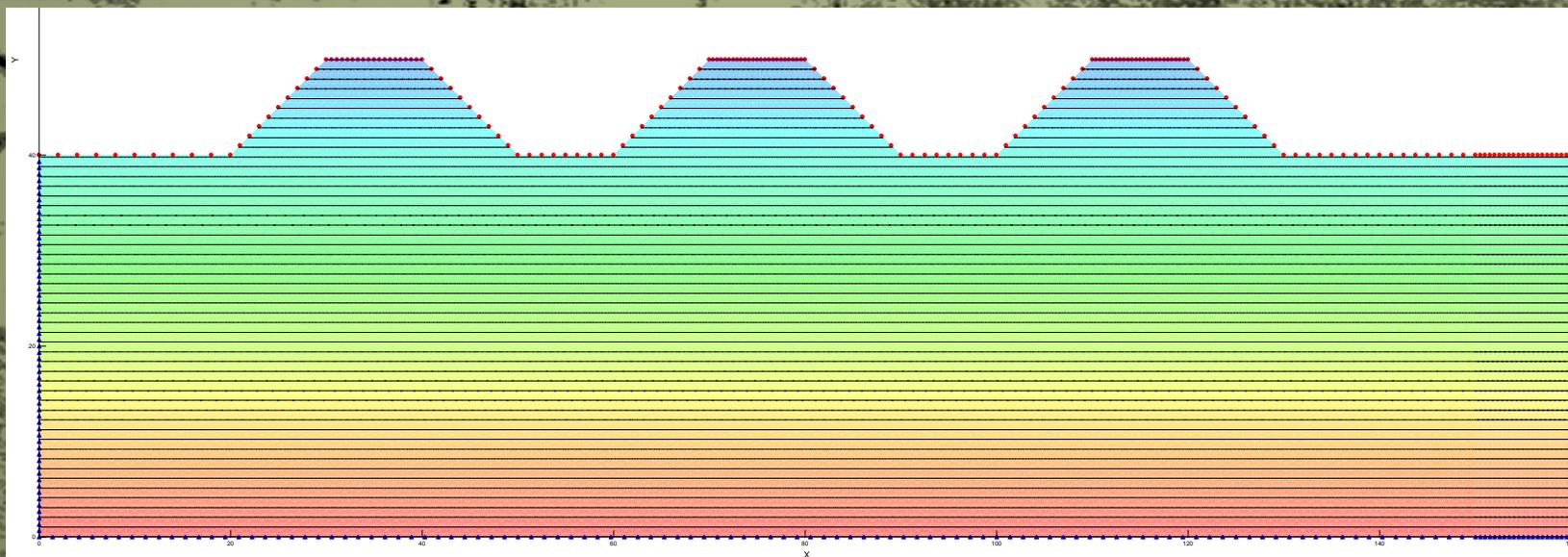
# Condição inicial – Modelo 1

$K_{sat} = 2.5 * 10^{-7} \text{ m/s}$

Curva de retenção da amostra – FRP484-CT07

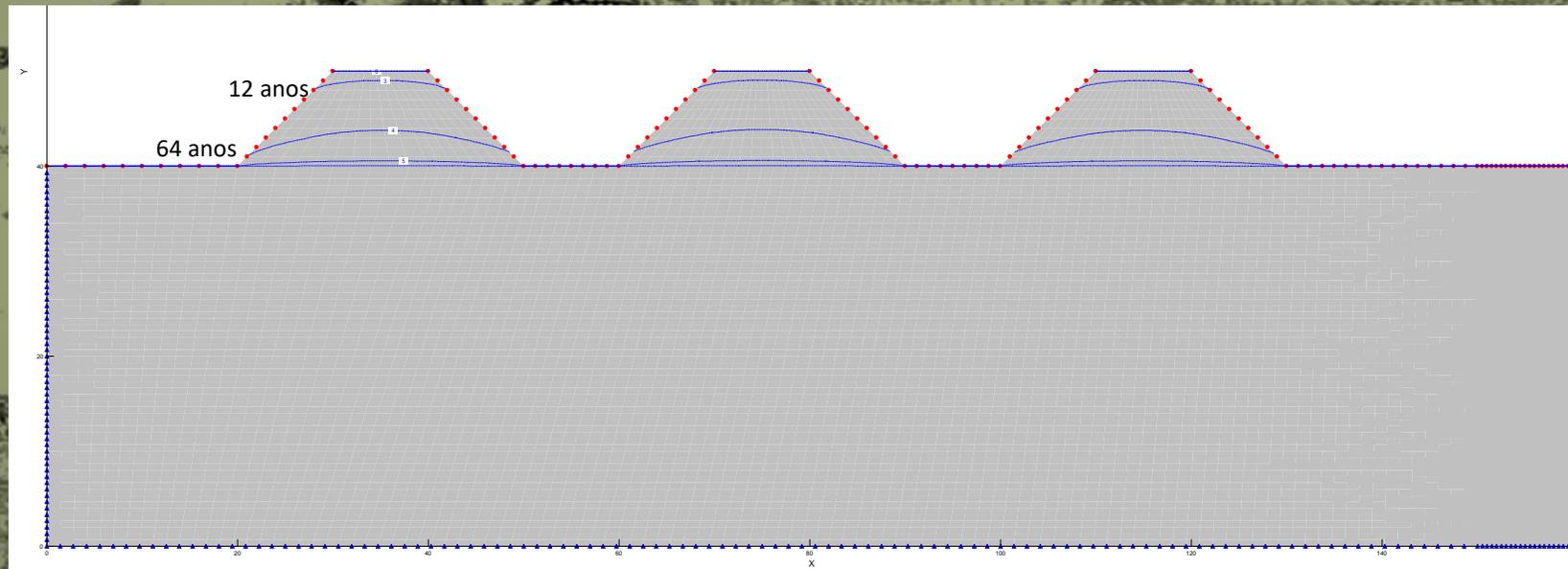


Condição inicial – Modelo 2



## Condição inicial – Modelo 2

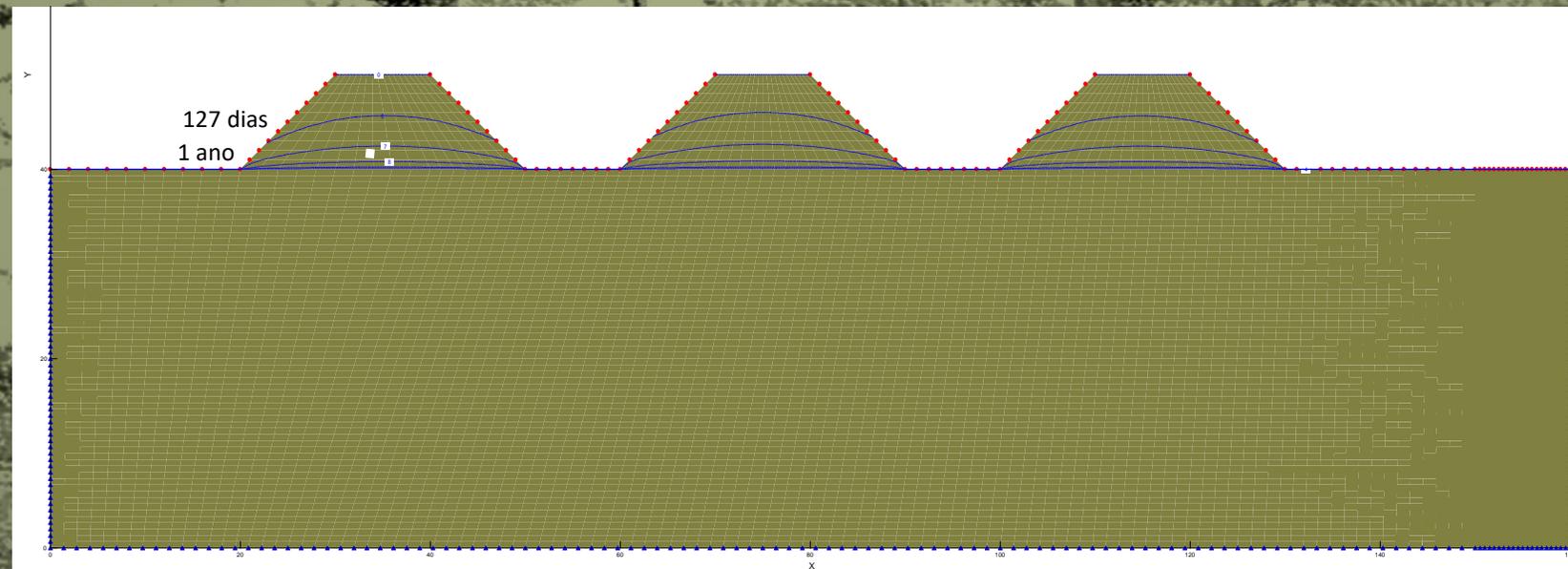
$K_{\text{sat}} = 4.7 * 10^{-9} \text{ m/s}$   
Curva de retenção da amostra – FRP516-CT03





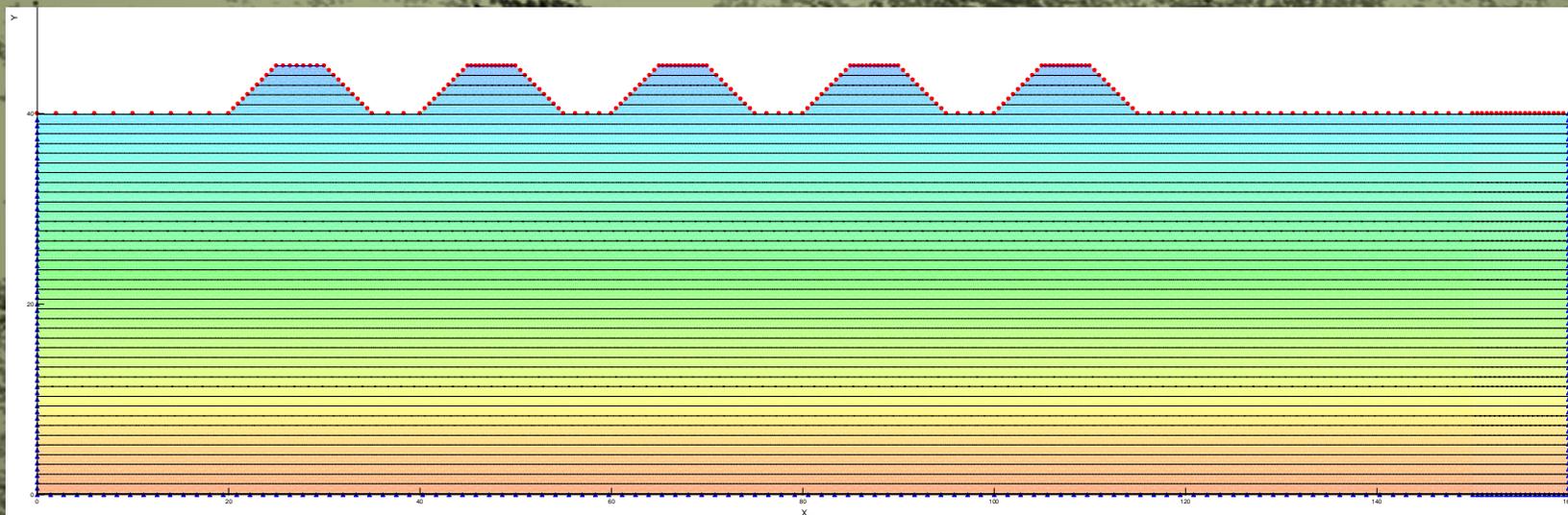
## Condição inicial – Modelo 2

$K_{\text{sat}} = 2.5 \cdot 10^{-7} \text{ m/s}$   
Curva de retenção da amostra – FRP484-CT07



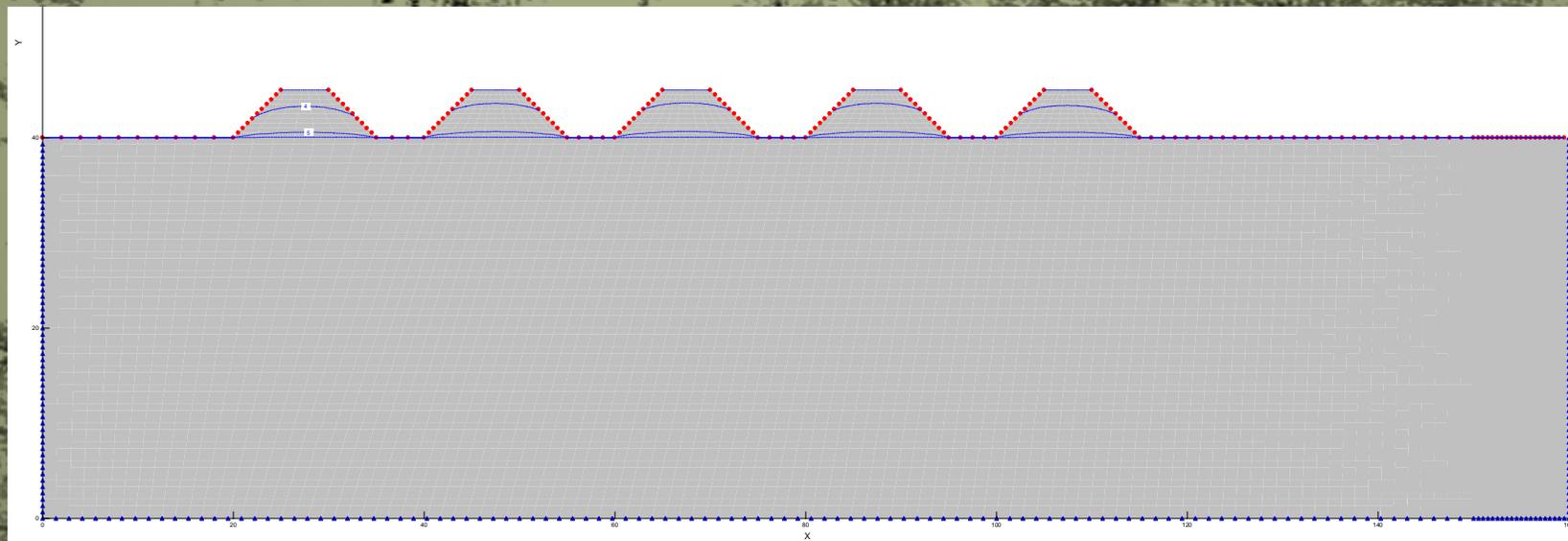
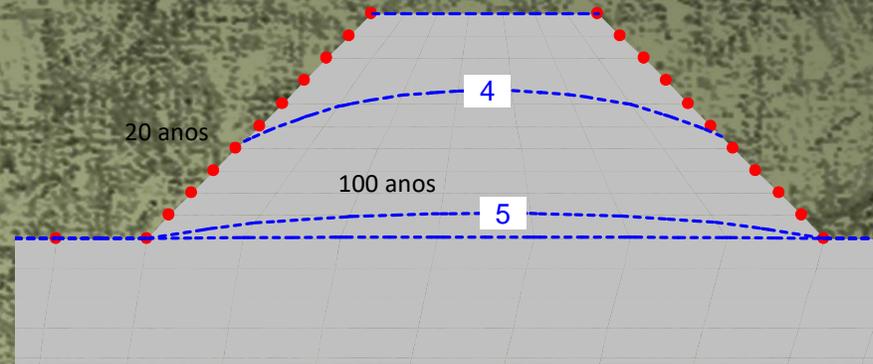


Condição inicial – Modelo 3



# Condição inicial – Modelo 3

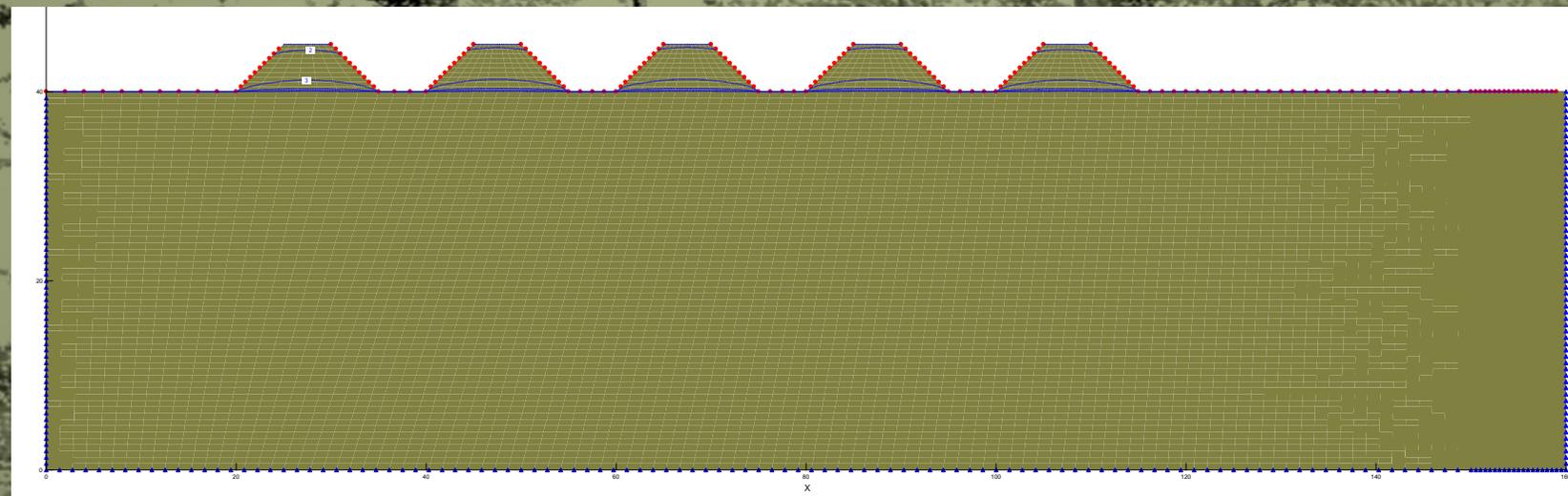
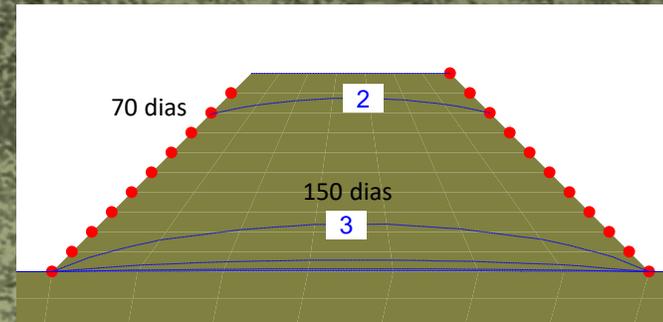
$K_{sat} = 4.7 * 10^{-9} \text{ m/s}$   
Curva de retenção da amostra – FRP516-CT03





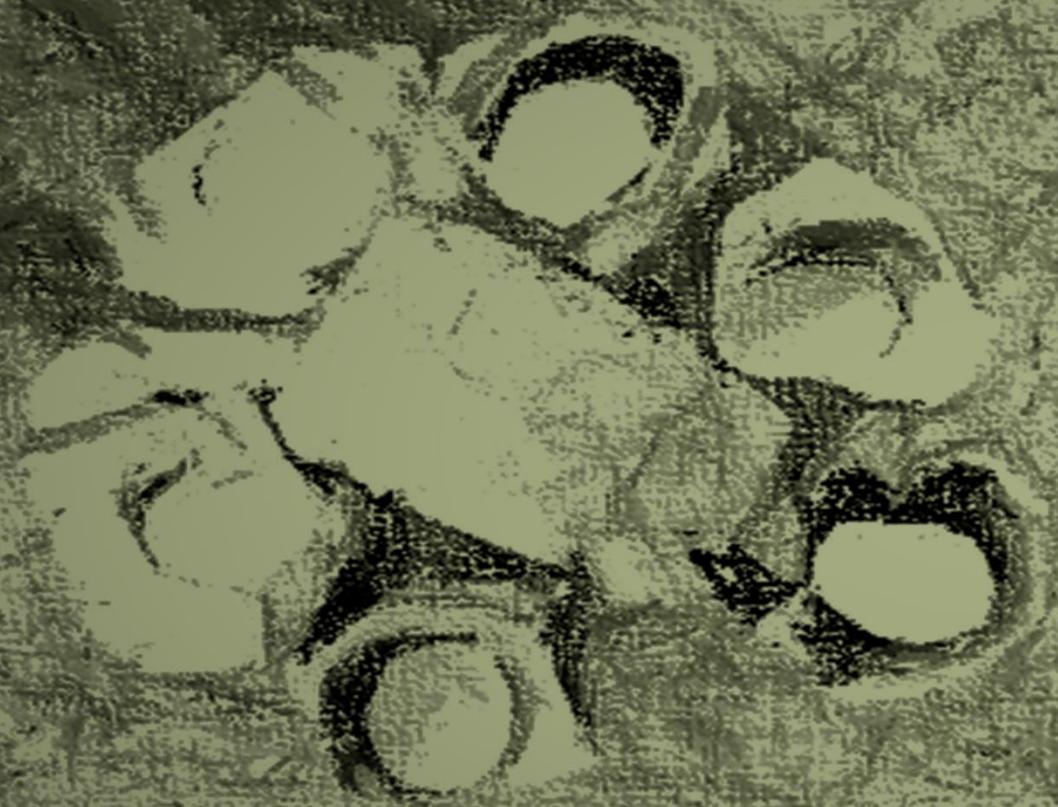
## Condição inicial – Modelo 3

$K_{\text{sat}} = 2.5 \cdot 10^{-7} \text{ m/s}$   
Curva de retenção da amostra – FRP484-CT07





## Estabilidade de Taludes



A "Gravidade" dos Fatos



Marinho (2008)



Marinho (2008)



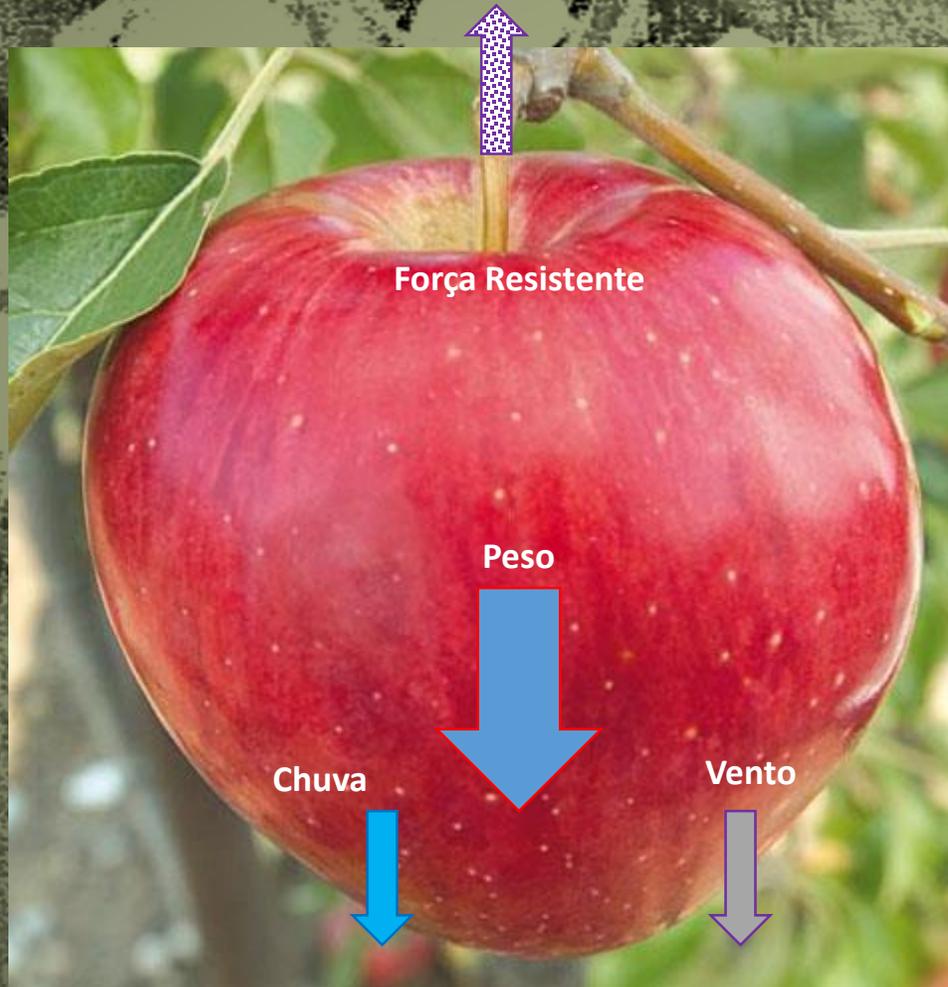
Marinho (2008)

$$FS = \frac{s}{\tau}$$

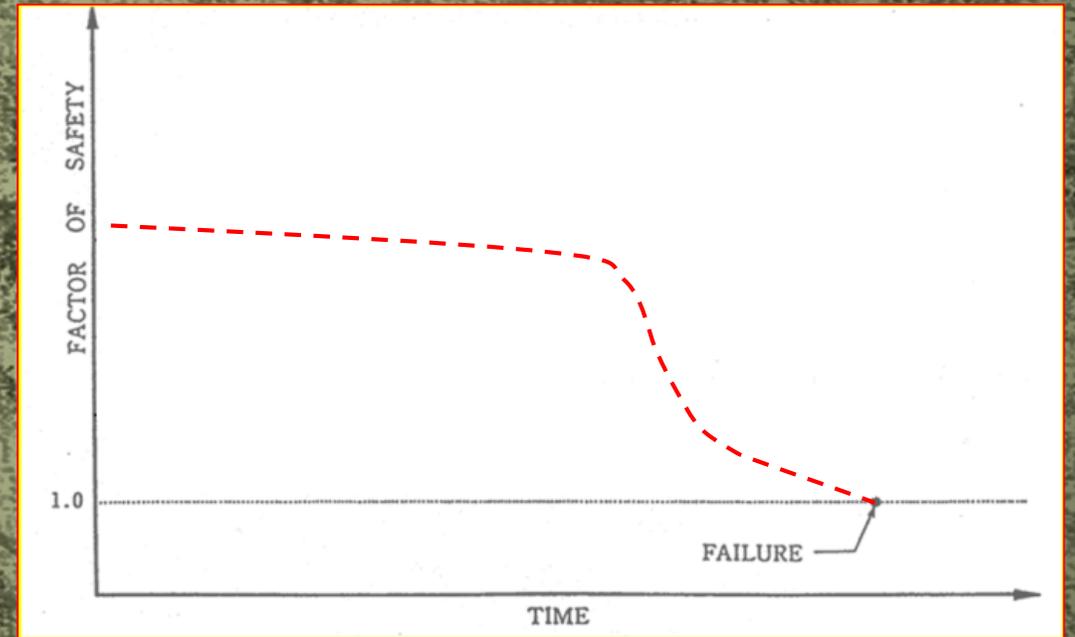
$s$  ← Resistência ao cisalhamento disponível  
 $\tau$  ← Resistência ao cisalhamento de equilíbrio

$$\text{se } \tau = s \Rightarrow FS = 1$$

Por que as coisas caem?  
Por que as coisas não caem?  
Quando as coisas vão cair?

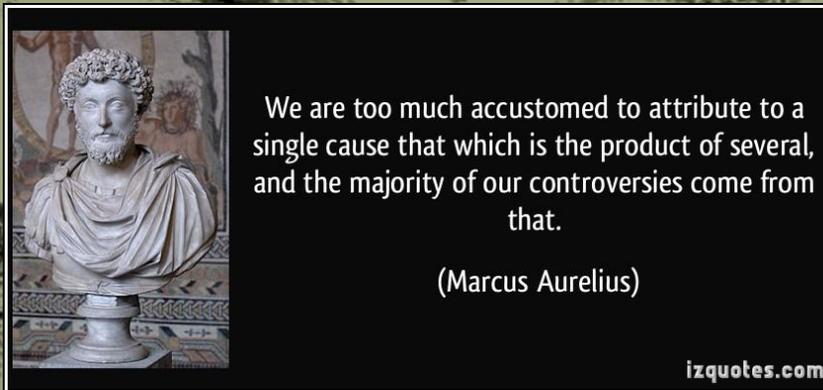


Se a força resistente = peso  $\Rightarrow$  Fator de Segurança = 1



## “Conclusões sobre as Causas de uma Ruptura”

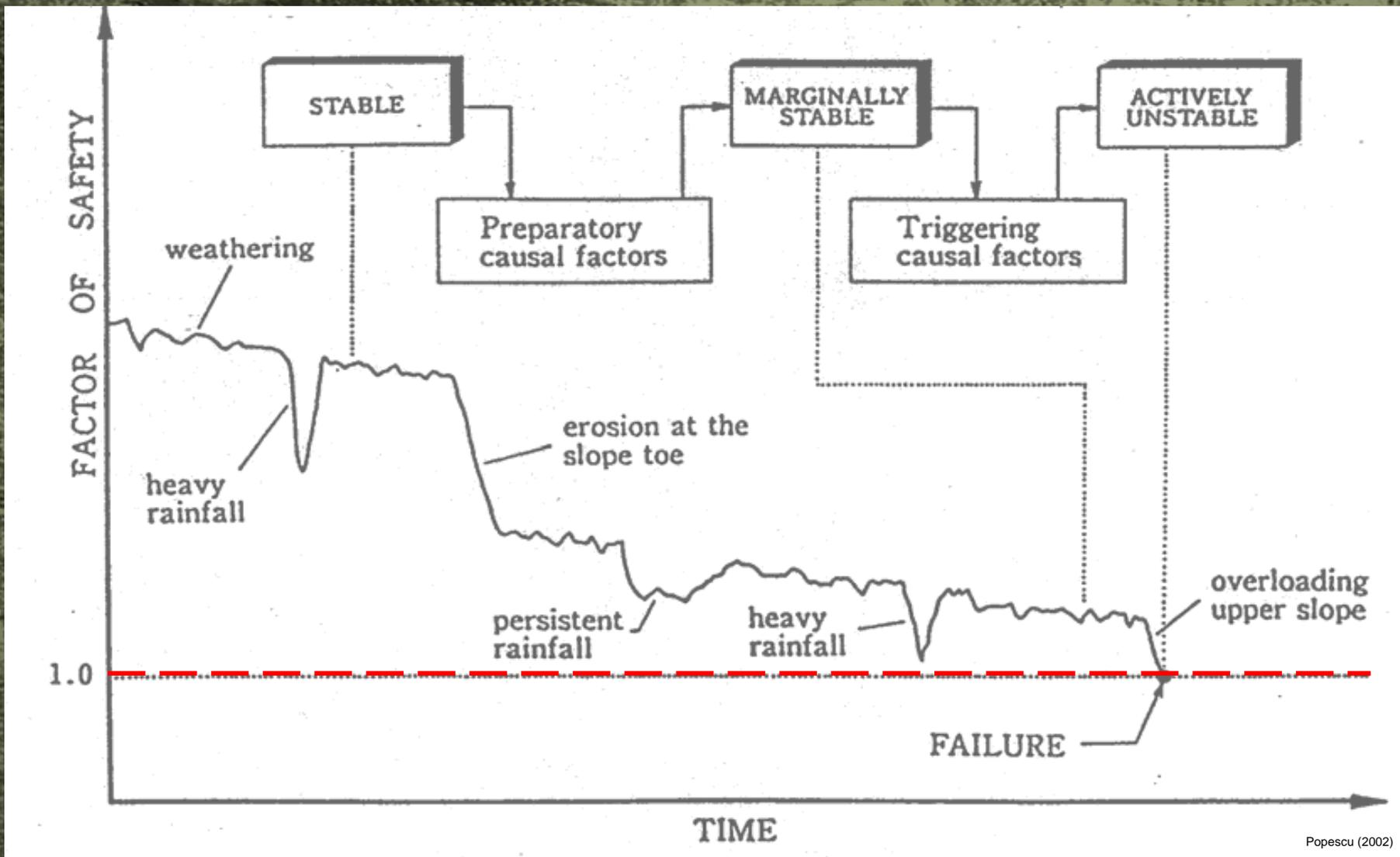
O evento B aconteceu imediatamente após o evento A.  
Logo, o evento A é a causa do evento B.



*Causa Única x Várias Causas*

# Degradação do FS com o tempo

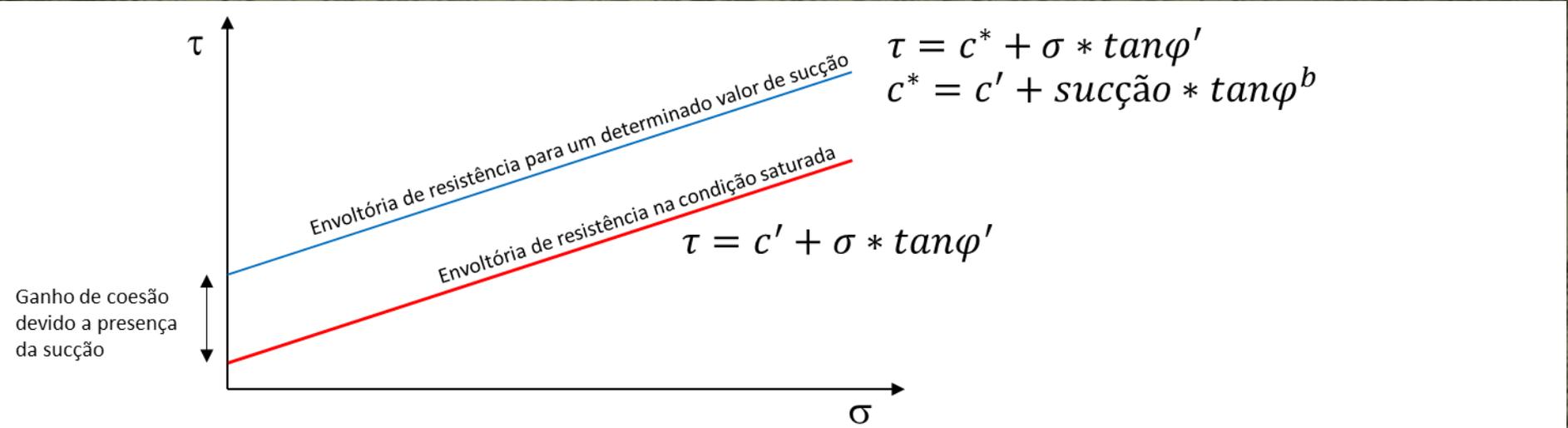
*“Calling the final factor the cause is like calling the match that lit the fuse that detonated the dynamite that destroyed the building the cause of the disaster”*  
Sowers (1979).



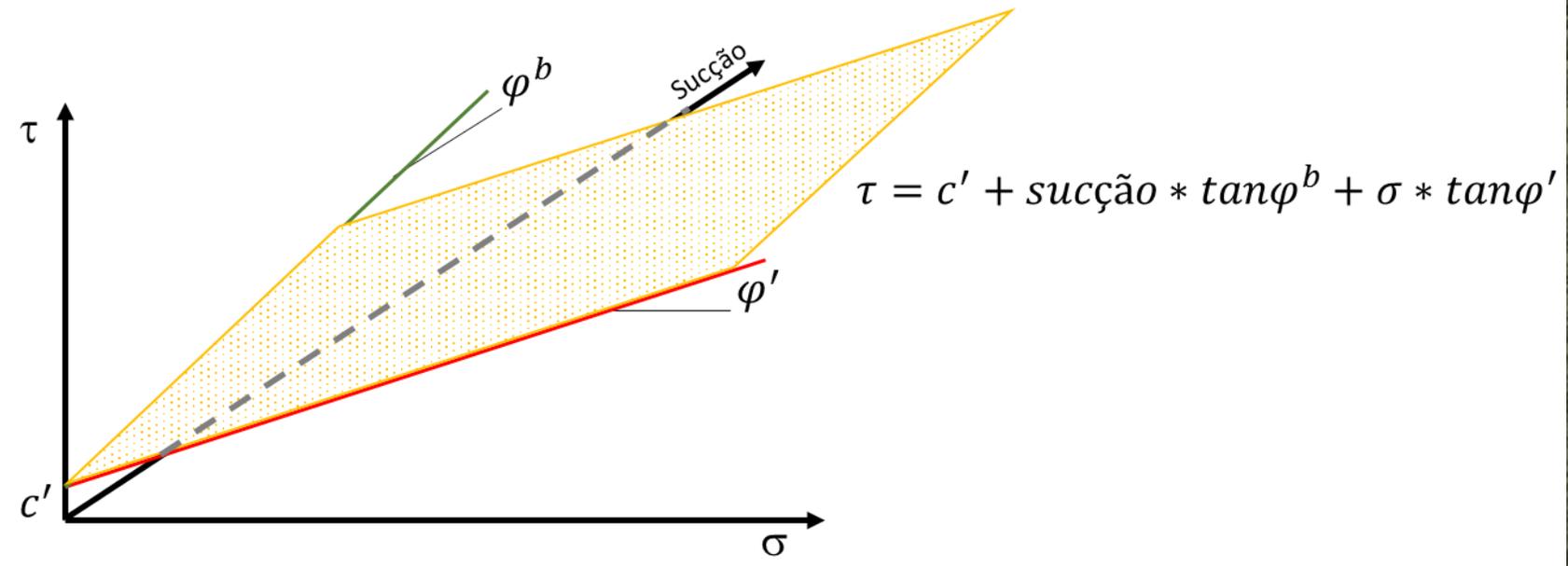


**A Natureza Trabalha com um Fator de  
Segurança Pouco Acima de 1**

# Envoltórias de Resistência

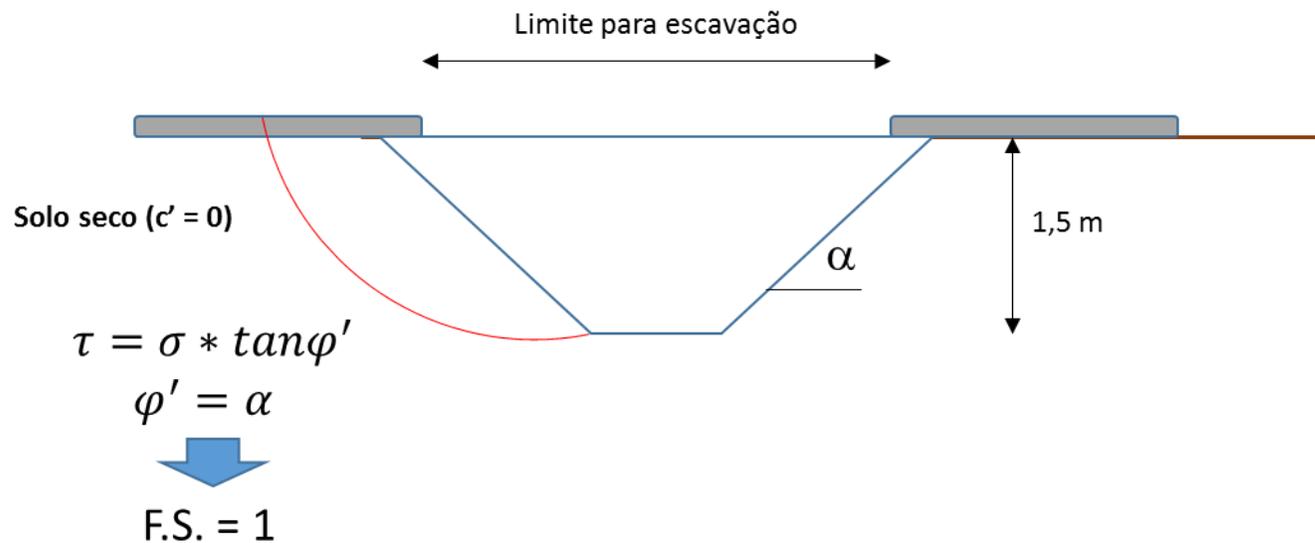


(a)

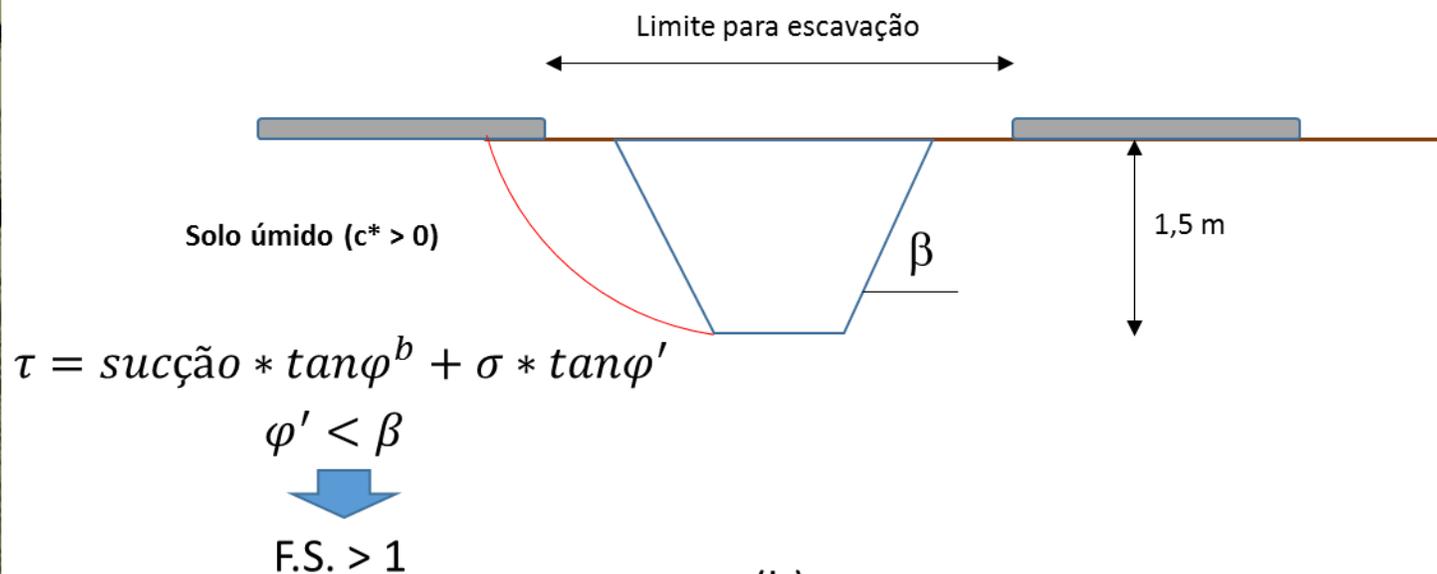


(b)

# Exemplo - Areia

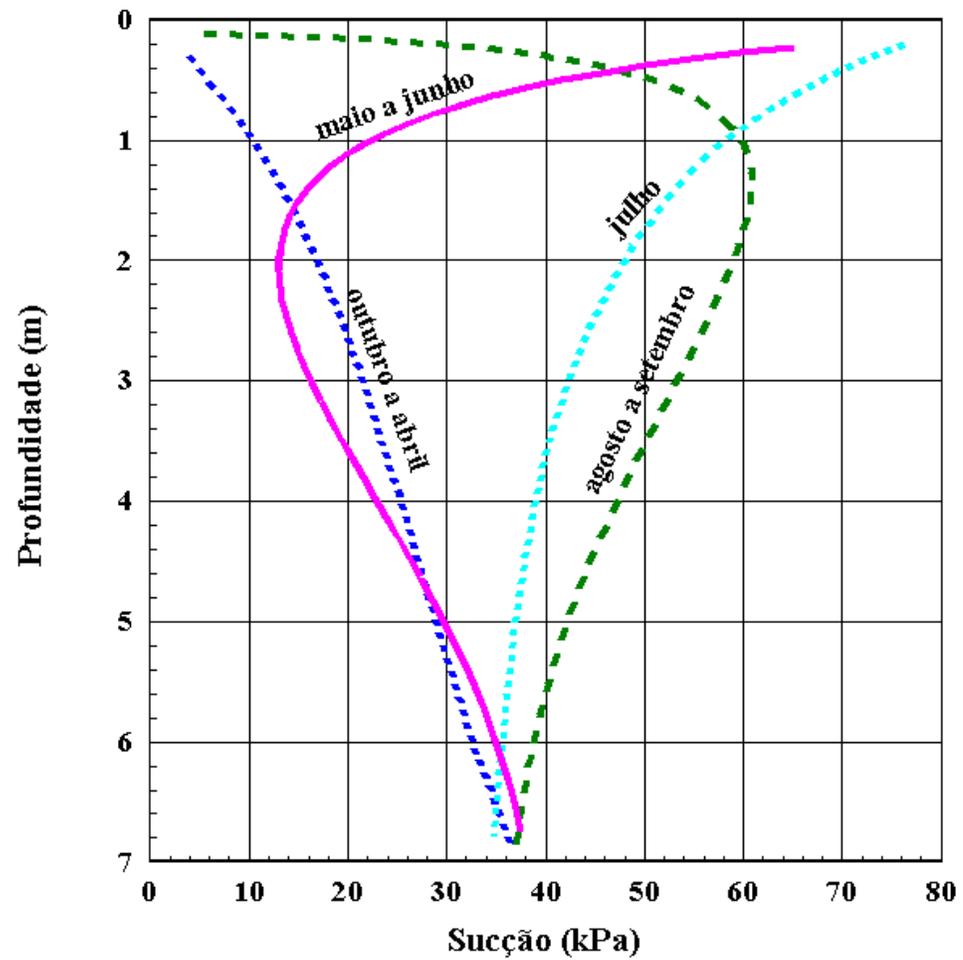


(a)



(b)

# Variação Sazonal de Sucção



## Parâmetros de Resistência

**Table 11.1** Experimental Values Measured for  $\phi^b$

Soil Type	$c'$ (kPa)	$\phi'$ (deg)	$\phi^b$ (deg)	Test Procedure	Reference
Compacted shale; $w = 18.6\%$	15.8	24.8	18.1	Constant water content triaxial	Bishop et al. (1960)
Boulder clay; $w = 11.6\%$	9.6	27.3	21.7	Constant water content triaxial	Bishop et al. (1960)
Dhanauri clay; $w = 22.2\%$ , $\rho_d = 1580 \text{ kg/m}^3$	37.3	28.5	16.2	Consolidated drained triaxial	Satija (1978)
Dhanauri clay; $w = 22.2\%$ , $\rho_d = 1478 \text{ kg/m}^3$	20.3	29.0	12.6	Constant drained triaxial	Satija (1978)
Dhanauri clay; $w = 22.2\%$ , $\rho_d = 1580 \text{ kg/m}^3$	15.5	28.5	22.6	Consolidated water content triaxial	Satija (1978)
Dhanauri clay; $w = 22.2\%$ , $\rho_d = 1478 \text{ kg/m}^3$	11.3	29.0	16.5	Constant water content triaxial	Satija (1978)
Madrid grey clay; $w = 29\%$	23.7	22.5 <sup>a</sup>	16.1	Consolidated drained direct shear	Escario (1980)
Undisturbed decomposed granite; Hong Kong	28.9	33.4	15.3	Consolidated drained multistage triaxial	Ho and Fredlund (1982a)
Undisturbed decomposed rhyolite; Hong Kong	7.4	35.3	13.8	Consolidated drained multistage triaxial	Ho and Fredlund (1982a)
Tappen-Notch Hill silt; $w = 21.5\%$ , $\rho_d = 1590 \text{ kg/m}^3$	0.0	35.0	16.0	Consolidated drained multistage triaxial	Krahn et al. (1989)
Compacted glacial till; $w = 12.2\%$ , $\rho_d = 1810 \text{ kg/m}^3$	10.0	25.3	7–25.5	Consolidated drained multistage direct shear	Gan et al. (1988)

<sup>a</sup> Average value.

